ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛІОТЕКА

ТОМЪ

МАГНИТНЫЙ ПОТОКЪ

И

ЕГО ДѢЙСТВІЯ.

Физическое объясненіе динамомашинъ, трансформаторовъ и электродвигателей съ обыкновеннымъ и вращающимся магнитнымъ полемъ.

Съ 61 рисункомъ въ текстѣ.

2-ое дополненное изданіе.

6 лекцій

И. И. БОРГМАНА,

Профессора Императорскаго С.-Петербургскаго Университета.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Изданіе журнала «Электричество».

1900.

Печатано по распоряженію Императорскаго Русскаго Техническаго Общества.

Типографія Министерства Путей Сообщенія
(Т-ва И. Н. Кушнеревъ и К°), Фонтанка, 117.

Предисловіе къ 1-му изданію.

Настоящія лекціи были читаны мною въ февралѣ текущаго года отъ Научнаго Отдѣла при Педагогическомъ Музеѣ Военно-учебныхъ заведеній въ аудиторіи Музея въ пользу народныхъ школъ въ мѣстностяхъ, пострадавшихъ отъ неурожая. Въ печати эти лекціи являются съ нѣкоторыми дополненіями и развитіемъ того, что по недостатку времени не могло быть сообщено въ устномъ изложеніи.

Я считаю пріятнымъ долгомъ выразить свою глубокую благодарность Н. Н. Вознесенскому, А. Л. Гершуну и М. А. Шателену за ихъ любезную помощь при производствѣ опытовъ, а также Н. Н. Хамонтову, не мало потрудившемуся при приготовленіи магнитныхъ спектровъ. Приношу благодарность и В. Л. Францену за изготовленіе моделей двигателей съ вращающимся магнитнымъ полемъ и колецъ для перемѣнныхъ токовъ къ машинѣ Грамма.

И. Боргманъ.

Май 1892 г.

Предисловіе къ 2-му изданію.

Въ настоящемъ изданіи мои лекціи являются со многими редакціонными измѣненіями, а также съ дополненіями. Вслѣдствіе этихъ дополненій я нашелъ болѣе удобнымъ увеличить самое число лекцій. Въ настоящемъ изданіи ихъ 6, а въ первомъ было только 4.

И. Боргманъ.

Декабрь 1899 г.

Лекція 1-я.

Въ настоящей своей лекціи я намѣренъ обратить ваше вниманіе на нѣкоторыя давно извѣстныя явленія, относительно которыхъ трудами знаменитыхъ математиковъ была выработана весьма изящная въ математическомъ отношеніи теорія. Нѣсколько лѣтъ тому назадъ казалось, что по поводу этихъ явленій уже сказано послѣднее слово, все подведено подъ простые законы и потому вполнѣ выясненъ внутренній механизмъ самихъ явленій. Но далеко не въ такомъ видѣ представляется это дѣло въ настоящее время. Напротивъ, накопившійся фактическій матеріалъ, заставившій отбросить прежнюю теорію, оказывается еще далеко недостаточнымъ для построенія новой, отчетливо рисующей самый процессъ явленій. Магнитъ въ настоящее время является наиболѣе загадочнымъ изъ всего того, что разсматривается въ физикѣ. Этотъ кусокъ естественнаго магнита, который я держу въ рукахъ (рис. 1), десятки лѣтъ сохраняется въ нашемъ университетскомъ физическомъ кабинетѣ. Неизвѣстно, сколько столѣтій, а можетъ и тысячелѣтій, съ тѣми же своими свойствами онъ лежалъ въ землѣ. И этотъ кусокъ, однако, не безжизненная, инертная масса; нѣтъ, то, что знаемъ мы теперь, заставляетъ предполагать внутри его и вокругъ его непрерывное движеніе, ни на моментъ не прекращавшееся. Онъ окруженъ какъ бы особою атмосферою, находящеюся въ постоянномъ движеніи, и только благодаря такому поддерживающемуся непрерывно движенію представляетъ характерныя свои особенности.

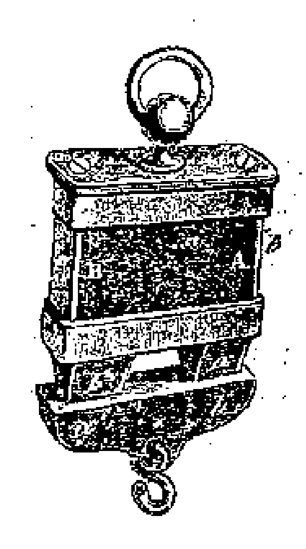


Рис. 1.

Какъ видно, еще много надо узнать, многое изслѣдовать, чтобы выяснилась истинная природа такого явленія. Однако, и

то, что извѣстно, заслуживаетъ вниманія, особенно, если принять еще въ соображеніе тѣ практическія примѣненія, какія получили магниты въ настоящее время.

Представить основы современнаго ученія о магнитныхъ явленіяхъ и выяснить физическую сторону нѣкоторыхъ главнѣйшихъ статей электротехники и составляетъ цѣль моихъ лекцій.

Не могу не остановиться вначалѣ на бѣгломъ, краткомъ обзорѣ исторіи развитія знаній о магнитныхъ явленіяхъ. Свойство особой желѣзной руды (магнитный желѣзнякъ) притягивать къ себѣ желѣзо извѣстно было въ глубокой древности. Была распространена даже басня, передаваемая Пливіемъ, о томъ, какъ открылось такое свойство этой руды. Разсказывали, что одинъ пастухъ, по имени Магнесъ, во время пастьбы своего скота случайно попалъ на мѣсто, гдѣ гвозди его сандалій и желѣзное остріе его палки такъ сильно притянулись къ землѣ, что онъ только съ трудомъ могъ оторвать ихъ, что будто бы Магнесъ сталъ копать въ этомъ мѣстѣ землю и нашелъ въ ней особый камень, который и назвалъ магнитомъ. Наиболѣе вѣроятное происхожденіе слова «магнитъ» — это отъ названія города, «Магнезія», въ Лидіи около котораго находилась такая руда. На это указываетъ само названіе руды: Magnesia lithos или, раньше, Lithos herakleia, т. е. камень Магнезіи или камень Гераклеи, такъ какъ городъ Магнезія прежде носилъ названіе «Гераклея».

Древніе знали лишь про одно свойство естественнаго магнита, а именно про его способность притягивать желѣзо. Въ Европѣ только въ XII столѣтіи стали употребляться искусственные стальные магниты для приготовленія компасовъ. По крайней мѣрѣ, объ этомъ впервые упоминается только въ сочиненіи Гюйо (Guyot de Provins), которое было написано около 1190 г. И эти свѣдѣнія о магнитахъ были занесены въ Европу арабами. Въ Китаѣ-же употребленіе стальныхъ магнитовъ для указанія странъ свѣта, т. е. пользованіе ими, какъ *компасами*, относится къ глубокой древности. Болѣе, чѣмъ за 2000 лѣтъ до Р. Х., китайцы примѣняли уже стальные магниты при своихъ странствованіяхъ какъ по сушѣ, такъ и по водѣ. Они имѣли понятіе даже о *«магнитномъ склоненіи»*, т. е. знали, что магнитъ, помѣщенный на поплавкѣ, плавающемъ на водѣ, устанавливается своею длиною не точно по направленію полуденной линіи, а нѣсколько отклонившись отъ этого направленія.

Теперь намъ извѣстно, что магнитъ, лежащій на пробкѣ, плавающей на поверхности воды, или горизонтально подвѣшенный на незакрученной нити, устанавливается въ опредѣленномъ положеніи и, если только по близости его нѣтъ массъ желѣза, стали, чугуна, никкеля, кобальта, или другихъ магнитовъ, не испытываетъ никакой силы, которая могла бы произвести поступательное перемѣщеніе его. *На магнитъ дѣйствуетъ только направляющая сила*, т. е. сила, которая удерживаетъ его въ опредѣленномъ положеніи и оказываетъ сопротивленіе повороту магнита около вертикальной линіи, проходящей черезъ его середину. Подъ вліяніемъ этой то направляющей силы магнитъ и возвращается назадъ въ свое положеніе равновѣсія, когда онъ будетъ отклоненъ изъ этого положенія на какой либо уголъ. Но, возвращаясь въ свое первоначальное положеніе, магнитъ подъ вліяніемъ инерціи, т. е. благодаря пріобрѣтенной скорости, переходитъ черезъ это положеніе и отклоняется на нѣкоторый уголъ въ другую сторону, затѣмъ снова поворачиваетъ назадъ, снова переходитъ свое первоначальное положеніе и, продолжая колебаться около этого положенія, онъ вполнѣ успокоивается только послѣ многихъ такихъ колебаній. Въ этомъ отношеніи магнитъ аналогиченъ обыкновенному маятнику [1]). Когда подвѣшенный за свою середину магнитъ находится въ покоѣ и по близости его нѣтъ никакихъ другихъ магнитовъ, а также нѣтъ массъ желѣза, чугуна, стали, никкеля или кобальта, то *магнитная ось магнита* (такъ называется направленіе въ магнитѣ, параллельное прямой линіи, которая соединяетъ собою два мѣста поверхности магнита,

[1]) Теорія и опытъ показываютъ, что законы колебанія обыкновеннаго маятника и магнита совершенно одинаковы. Въ томъ и другомъ случаѣ продолжительность одного *полнаго* колебанія, т. е. промежутокъ времени, заключающійся между двумя слѣдующими другъ за другомъ прохожденіями чрезъ положеніе равновѣсія при одинаковомъ направленіи движенія (слѣва направо или, обратно, справа налѣво), выразится, если только размахи, дѣлаемые маятникомъ или магнитомъ, *очень малы*, формулою:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}}.$$

Въ этой формулѣ K обозначаетъ такъ называемый *моментъ инерціи маятника или магнита около оси вращенія* того или другого, а D обозначаетъ тотъ моментъ вращенія около этой оси, какой испытываетъ маятникъ или магнитъ, когда этотъ маятникъ или магнитъ будетъ отклоненъ на 90° отъ своего положенія равновѣсія.

обнаруживающія наиболѣе сильное притяженіе желѣза) располагается въ вертикальной плоскости, получившей названіе «*плоскость магнитнаго меридіана*» и составляющей вообще нѣкоторый уголъ съ плоскостью географическаго меридіана. Этотъ уголъ между двумя меридіанами, магнитнымъ и географическимъ, и носитъ названіе: «*магнитное склоненіе*». Этотъ уголъ согласились отсчитывать въ томъ квадрантѣ, который находится на сѣверной сторонѣ, и согласились отсчитывать его въ направленіи отъ географическаго меридіана къ магнитному. Въ различныхъ мѣстахъ на земной поверхности магнитныя склоненія оказываются весьма различными. Кажется, несомнѣнно, что изъ европейцевъ первый Колумбъ, во время своего путешествія въ Америку, въ 1492 году, обратилъ вниманіе на магнитное склоненіе и наблюдалъ измѣненія его съ перемѣною мѣста. Впрочемъ, нѣкоторые утверждаютъ, что еще въ 1269 году Петръ Адзигеріусъ зналъ о магнитномъ склоненіи. Въ большей части Европы склоненія западныя, въ восточной Россіи и Азіи склоненія повсюду восточныя. Для Петербурга склоненіе очень не велико. Въ 1896 г. въ г. Павловскѣ, близъ Петербурга, тамъ, гдѣ помѣщается Константиновская магнитная обсерваторія, магнитное склоненіе было восточное и равнялось всего только $21',29$. Въ томъ же, 1896 году, магнитное склоненіе въ Иркутскѣ было также восточное, но равнялось уже $2^{\circ} 5',17$, въ Вѣнѣ оно было западное и равнялось $8^{\circ} 30',5$, въ Парижѣ также западное и равнялось $15^{\circ} 3',9$. Точныя наблюденія надъ положеніемъ горизонтально подвѣшеннаго магнита показываютъ, что нигдѣ на земной поверхности магнитное склоненіе не остается постояннымъ. Оно измѣняется непрерывно. При этомъ измѣненія магнитнаго склоненія обнаруживаютъ вполнѣ ясный періодическій характеръ. Различаются три рода такихъ періодическихъ измѣненій склоненія: измѣненія суточныя, годовыя и вѣковыя. Кромѣ этихъ непрерывно происходящихъ измѣненій склоненія, иногда наблюдаются измѣненія внезапныя, которыя нарушаютъ собою обычное весьма медленное движеніе оси магнита то къ западу, то къ востоку. Такія рѣзкія перемѣны въ склоненіи соотвѣтствуютъ такъ называемымъ *магнитнымъ бурямъ* и находятся въ тѣсной связи съ явленіями, происходящими на поверхности солнца, съ появленіемъ на солнцѣ пятенъ или образованіемъ на краю солнечнаго диска протуберанцевъ, а также съ сѣверными сіяніями.

Магнитъ, помѣщенный на горизонтальной оси, проходящей черезъ центръ тяжести его и расположенной перпендикулярно къ магнитному меридіану, т. е. *магнитъ, вращающійся около своего центра тяжести и въ плоскости магнитнаго меридіана*, устанавливается такъ, что магнитная ось его образуетъ съ горизонтальною линіею нѣкоторый уголъ. Въ сѣверномъ полушаріи магнитъ наклоняется внизъ своимъ *сѣвернымъ* концомъ, какъ называется тотъ конецъ магнита, который обращается къ сѣверу, когда магнитъ подвѣшенъ горизонтально. Въ южномъ полушаріи отклоняется внизъ противоположный конецъ магнита, такъ называемый *южный*. Уголъ, который образуется при этомъ между магнитною осью магнита, за положительное направленіе которой условно принимается направленіе отъ южнаго конца магнита къ сѣверному, и горизонтальною линіею, проведенною въ магнитномъ меридіанѣ въ сторону къ сѣверу, называется *магнитнымъ наклоненіемъ*. Магнитное наклоненіе, какъ и склоненіе, неодинаково для различныхъ мѣстъ на земной поверхности. По мѣрѣ увеличенія географической широты мѣста увеличивается вообще и магнитное наклоненіе. Въ 1896 году въ Тифлисѣ наклоненіе было 55°48′,08, въ Павловскѣ, близъ Петербурга, оно было 70°,41′,58, въ Вѣнѣ — 63°,7′,1, въ Парижѣ — 66°1′,6. Но и въ одномъ и томъ же мѣстѣ магнитное наклоненіе не остается неизмѣннымъ. Такъ же, какъ и для склоненія, наблюденія обнаруживаютъ троякаго рода періодическія измѣненія наклоненія: суточныя, годовыя и вѣковыя. Во время магнитныхъ бурь происходятъ особыя возмущенія магнитнаго наклоненія.

Магнитъ, находящійся на оси, проходящей черезъ центръ тяжести его, но не перпендикулярной къ плоскости магнитнаго меридіана, т. е. магнитъ, вращающійся около своего центра тяжести въ какой-нибудь вертикальной плоскости, *не совпадающей* съ плоскостью магнитнаго меридіана, устанавливается въ этой плоскости такъ, что образуетъ съ горизонтальною линіею уголъ, который вообще *больше*, чѣмъ магнитное наклоненіе въ этомъ мѣстѣ. И когда вертикальная плоскость, въ которой вращается такой магнитъ, будетъ перпендикулярна магнитному меридіану, то магнитъ устанавливается вертикально. Но есть мѣста на земной поверхности, въ которыхъ магнитъ, вращающійся около горизонтальной оси, проходящей черезъ центръ тяжести его, (маг-

нитъ *инклинатора*), при любомъ направленіи этой оси, т. е. при любомъ положеніи плоскости, въ которой онъ можетъ вращаться (при любомъ положеніи плоскости инклинатора), устанавливается вертикально. Въ этихъ мѣстахъ магнитное наклоненіе равно, слѣдовательно, 90°. Въ этихъ мѣстахъ магнитъ, подвѣшенный горизонтально, не имѣетъ стремленія расположиться въ какомъ-нибудь опредѣленномъ направленіи, онъ устанавливается такъ, какъ устанавливается любой немагнитный стержень, который будетъ подвѣшенъ горизонтально на ту же нить, т. е. онъ принимаетъ положеніе, при которомъ нить является раскрученною. Итакъ, въ этихъ мѣстахъ магнитъ не испытываетъ направляющей силы въ горизонтальной плоскости; здѣсь нѣтъ и опредѣленнаго магнитнаго меридіана, здѣсь всякая вертикальная плоскость есть въ то же время плоскость магнитнаго меридіана. Такія точки на земной поверхности называются *магнитными полюсами земли*. Магнитныхъ полюсовъ земли два: одинъ — сѣверный, въ немъ магнитъ инклинатора устанавливается своимъ сѣвернымъ концомъ внизъ, другой — южный, въ немъ магнитъ инклинатора обращаетъ внизъ свой южный конецъ. Сѣверный магнитный полюсъ земли находится, согласно опредѣленію, сдѣланному Гауссомъ въ 1838 году, въ сѣверномъ полушаріи и имѣетъ широту, равную 73°35′, а долготу, къ западу отъ Гринвича, равную 95°39′. Южный магнитный полюсъ земли расположенъ въ южномъ полушаріи и, согласно опредѣленію Гаусса, имѣетъ широту, равную 72°35′, а долготу, къ востоку отъ Гринвича, равную 152°30′. Во всѣхъ мѣстахъ, окружающихъ собою сѣверный магнитный полюсъ земли, магнитъ, подвѣшенный горизонтально, обращается своимъ сѣвернымъ концомъ къ этому полюсу. Во всѣхъ мѣстахъ, окружающихъ собою южный магнитный полюсъ земли, горизонтально подвѣшенный магнитъ располагается такъ, что его южный конецъ повертывается къ этому полюсу. По мѣрѣ удаленія отъ того или другого магнитнаго полюса земли въ сторону къ экватору земного шара, наблюдается уменьшеніе магнитнаго наклоненія. Наклоненіе получается, наконецъ, равнымъ нулю. Линія, проходящая черезъ точки на земной поверхности, въ которыхъ магнитное наклоненіе равно нулю, носитъ названіе *магнитнаго экватора*.

Кромѣ двухъ магнитныхъ полюсовъ земли, встрѣчаются еще на земной поверхности мѣста, въ которыхъ магнитное наклоненіе

является очень большимъ и достигаетъ даже 90°. Около такихъ мѣстъ наблюдается вообще неправильное измѣненіе какъ наклоненія, такъ и склоненія. Такія *аномаліи* въ магнитныхъ склоненіяхъ и наклоненіяхъ зависятъ отъ нахожденія въ землѣ желѣзныхъ рудъ или другихъ минераловъ, содержащихъ въ своемъ составѣ желѣзо, т. е. обладающихъ сильно магнитными свойствами.

Склоненіе и наклоненіе вмѣстѣ опредѣляютъ направленіе *вращающей* силы, которую въ данномъ мѣстѣ на земной поверхности испытываетъ магнитъ независимо отъ притяженія его, какъ матеріальнаго тѣла, землею. Эту силу приписываютъ особому свойству земного шара, который разсматриваютъ при этомъ какъ большой магнитъ, и называютъ ее *силою земного магнетизма*. Идея о землѣ, какъ большомъ магнитѣ была высказана впервые Гильбертомъ [1]) въ его сочиненіи (De magnete magneticisque corporibus et de magno magnete tellure Physiologia nova), появившемся въ 1600 г. Въ этомъ сочиненіи въ первый разъ явленія магнетизма были разсмотрѣны научнымъ образомъ. Въ первый разъ было установлено различіе между двумя классами явленій: явленіями электрическими и явленіями магнетизма. До Гильберта тѣ и другія явленія смѣшивались другъ съ другомъ. Гильберту принадлежитъ и самый терминъ «*электричество*». Онъ обратилъ вниманіе между прочимъ и на явленіе взаимнаго отталкиванія одноименныхъ концовъ двухъ магнитовъ, объяснилъ причину установки магнита въ магнитномъ меридіанѣ и указалъ на необходимость существованія неодинаковаго наклоненія магнитной стрѣлки въ разныхъ мѣстахъ земной поверхности. Нѣсколько раньше Гильберта, а именно въ 1544 году, были даны концамъ магнита названія *полюсовъ*: тотъ конецъ магнита, который обращается на сѣверъ, былъ названъ *сѣвернымъ полюсомъ*, другой, противоположный ему, былъ названъ *южнымъ полюсомъ*. Эти названія были даны Гартманомъ, бывшимъ въ то время въ Нюрнбергѣ викаріемъ. Въ настоящее время подъ словами «полюсъ магнита» мы подразумѣваемъ не конецъ этого магнита, а нѣчто другое. Полюсъ магнита — это такая точка въ магнитѣ, въ ко-

---

[1]) Гильбертъ (Gilbert), врачъ по профессіи, родился въ Кольчестерѣ въ 1540 году, умеръ въ Лондонѣ въ 1603 г.

торой можно представить себѣ приложенною силу, являющуюся равнодѣйствующею всѣхъ силъ, испытываемыхъ всѣми точками одной половины магнита и происходящихъ отъ дѣйствія на эти точки магнетизма земного шара или, болѣе обще, отъ дѣйствія на нихъ какого либо другого магнита, расположеннаго на большомъ разстояніи отъ перваго.

Послѣ появленія сочиненія Гильберта, казалось бы, не должны бы были быть распространяемы ложныя свѣдѣнія о свойствахъ магнита, такъ какъ все существенное, все наиболѣе главное о магнитѣ было съ удивительною ясностью изложено въ этой замѣчательной книгѣ. Но далеко не такъ было на самомъ дѣлѣ. Еще долго послѣ Гильберта циркулировали вмѣстѣ съ вѣрными данными чисто фантастическія представленія. Какъ примѣръ такихъ фантастическихъ свѣдѣній о магнитныхъ явленіяхъ, могутъ служить тѣ яко бы факты, которые описываются въ интересной книгѣ (Magnes sive de arte magnetica etc.), напечатанной въ 1634 году и принадлежащей разносторонне образованному ученому іезуиту Кирхеру. Въ книгѣ Кирхера находится изложеннымъ почти все, что̀ было извѣстно въ то время вѣрнаго о магнитѣ, а вмѣстѣ въ тѣмъ содержится не мало и курьезовъ.

Для характеристики того, что заключается въ сочиненіи Кирхера, я позволю привести небольшую выдержку изъ весьма любопытной книги проф. Н. А. Любимова, изданной имъ подъ заглавіемъ: *Изъ книги иллюзій, тайнъ, чудесъ и т. д. С.-Петербургъ. 1888* (стр. 5).

«Изъ книги Кирхера можемъ узнать, что ма́гнитъ любитъ красный цвѣтъ и что, если обернуть его въ красную фланель, онъ становится сильнѣе и лучше сохраняетъ свою способность притягивать желѣзо, чѣмъ безъ такой одежды. Есть на то, оказывается, и причина. Магнитъ-царь камней; а потому ему и приличествуетъ царственное пурпуровое одѣяніе. Благородный камень не терпитъ за то чесноку. По увѣренію Кирхера, если натереть магнитъ чеснокомъ, онъ значительно утрачиваетъ въ своей притягательной силѣ. Далѣе, магнитъ имѣетъ болѣзни, противъ которыхъ нѣкоторыя травы дѣйствуютъ цѣлительно.

Самое понятіе магнетизма ученый авторъ, хотя не предчувствовавшій будущихъ диковинъ животнаго магнетизма, расширяетъ чрезвычайно. Онъ посвящаетъ въ своей книгѣ цѣлыя главы

магнетизму музыки, магнетизму цвѣтовъ, наконецъ, магнетизму любви, которой насчитываетъ четыре рода, въ томъ числѣ любовь къ наукѣ.

Любопытную диковину представляетъ описаніе удивительнаго существа, имя которому *борамецъ* и которое обладаетъ особою силою притяженія. По свидѣтельству Кирхера, описаніе этого существа находится у многихъ авторовъ и, между прочимъ, у Герберштейна въ его Московіи. По разсказу Кирхера, борамецъ есть удивительное татарское растеніе (admirabilis tartaricus frutex). Онъ водится въ древнѣйшей татарской ордѣ, именуемой Заволга (Zavolha). Здѣсь сажаютъ въ землю сѣмя, вродѣ сѣмени дыни, но покороче. Изъ сѣмени выростаетъ *борамецъ* или *агнецъ*, какъ его зовутъ (quod Boramez ideo agnum vocant). Выростаетъ онъ поверхъ ствола, фута въ три высотою, и имѣетъ фигуру, ноги, уши, совсѣмъ какъ баранъ, но безъ рогъ. Имѣетъ замѣчательное свойство притягивать къ себѣ окружающія травы и питается ими какъ баранъ въ густой травѣ. Ученые считаютъ его зоофитомъ (животно-растеніемъ) и приписываютъ ему магнитную силу по отношенію къ окружающимъ травамъ.

Кирхеръ, впрочемъ, не раздѣляетъ послѣдняго мнѣнія и думаетъ, что здѣсь дѣйствуютъ тѣ же силы, какими корни растеній отыскиваютъ свою пищу».

Итакъ, мы видимъ что въ XVII столѣтіи даже у людей ученыхъ, не мало изучившихъ, какъ Кирхеръ, было вполнѣ смутнымъ представленіе объ истиной природѣ явленій магнетизма. Прошло очень много времени, пока, наконецъ, уже извѣстныя явленія магнетизма были подведены подъ теорію. Только въ самомъ концѣ XVIII столѣтія послѣ знаменитыхъ работъ Кулона[1]), когда послѣднимъ былъ найденъ количественный законъ магнитныхъ взаимодѣйствій (1785 г.), получившій названіе «Закона Кулона» *(два количества магнетизма, сосредоточенныя въ двухъ точкахъ, дѣйствуютъ другъ на друга съ силою, пропорціональною произведенію этихъ количествъ и обратно пропорціональною квадрату разстоянія между ними)*, было положено основаніе теоріи магнетизма.

Въ концѣ XVIII и въ первыя десятилѣтія XIX столѣтія большая часть физическихъ явленій объяснялась, какъ извѣстно,

---

[1]) Кулонъ родился въ Ангулемѣ въ 1736 г., умеръ въ Парижѣ въ 1806 г.

существованіемъ въ природѣ особыхъ жидкостей, обладающихъ специальными свойствами, которыя и вызываютъ наблюдаемыя явленія. Это былъ своего рода фетишизмъ въ наукѣ. Явленія тепла приписывались нахожденію въ тѣлахъ особой субстанціи, отличной отъ обыкновенной матеріи и называвшейся теплородомъ. Явленія свѣта относились къ свойствамъ свѣтовой матеріи, также вполнѣ отличной отъ обыкновенной матеріи и не похожей на теплородъ. Явленія электрическія объяснялись присутствіемъ въ тѣлахъ двухъ электрическихъ жидкостей. Фетишемъ въ явленіяхъ магнитныхъ признавались двѣ магнитныя жидкости.

Эта гипотеза двухъ магнитныхъ жидкостей была впервые высказана во второй половинѣ XVIII столѣтія и представляла собою какъ бы перифразъ гипотезы, предложенный для объясненія электрическихъ явленій Сеймеромъ. Для объясненія магнитныхъ явленій допустили присутствіе въ стали и желѣзѣ двухъ магнитныхъ жидкостей, сѣверной и южной, не подчиняющихся тяготѣнію, т. е. невѣсомыхъ, и находящихся въ данномъ тѣлѣ смѣшанными одна съ другою въ равныхъ количествахъ. Предположили, что частицы одной и той же жидкости взаимно отталкиваютъ другъ друга, а частицы двухъ различныхъ жидкостей взаимно притягиваютъ одна другую. Когда тѣло намагничивается, тогда, согласно этой гипотезѣ, происходитъ раздѣленіе части одной жидкости отъ такой же части другой жидкости и вмѣстѣ съ тѣмъ происходитъ перемѣщеніе этихъ отдѣленныхъ другъ отъ друга жидкостей въ противоположные концы намагничиваемаго тѣла. Въ земномъ шарѣ обѣ эти жидкости раздѣлены одна отъ другой, причемъ южная жидкость распредѣлена на поверхности сѣвернаго полушарія и, главнымъ образомъ, въ полярныхъ частяхъ его, сѣверная жидкость скоплена на поверхности южнаго полушарія также по преимуществу около полюса. Кулонъ весьма существенно измѣнилъ эту гипотезу. Онъ впервые обратилъ вниманіе на то огромное различіе, какое наблюдается между явленіями электризаціи проводящихъ тѣлъ и явленіями намагничиванія желѣза или стали.

Всякому проводнику весьма легко сообщить какое угодно электричество, положительное или отрицательное. И если на тѣлѣ являются одновременно оба эти электричества, то не предста-

вляется никакого затрудненія совсѣмъ удалить одно изъ этихъ электричествъ или перевести его на другое тѣло. Совсѣмъ не то представляютъ собою тѣла намагниченныя. Любой магнитъ, распиленный пополамъ, въ обѣихъ своихъ половинахъ обнаруживаетъ по прежнему присутствіе обоихъ магнетизмовъ. Въ моихъ рукахъ находится намагниченная стальная часовая пружина. Я подношу однимъ, а затѣмъ другимъ концомъ ея къ одному и тому же концу магнитной стрѣлки, которая можетъ легко вращаться на остріѣ. По движеніямъ стрѣлки, противоположнымъ въ двухъ этихъ случаяхъ, вы можете заключить о присутствіи противоположныхъ магнетизмовъ на двухъ концахъ этой пружины. Теперь я ломаю пружину на двѣ части, продѣлываю съ тою и другою частью то же, что дѣлалъ съ цѣлою пружиною. Вы видите, результатъ получился совершенно такой же, какъ и раньше. Каждую часть этой пружины я разламываю опять пополамъ. Та и другая половинка каждой части пружины, какъ вы видите, оказывается имѣющею свойства цѣльнаго магнита. На сколько бы частей я не раздѣлялъ этотъ магнитъ, я получалъ бы все таки всѣ части магнита одинаково со свойствами цѣлаго магнита. На двухъ оконечностяхъ каждой такой части наблюдались бы по-прежнему противоположные магнетизмы. Даже та часть магнита, которая будетъ отдѣлена отъ самаго конца его, гдѣ, повидимому, заключается только одинъ магнетизмъ, сѣверный или южный, обнаружитъ присутствіе обоихъ магнитизмовъ. Въ виду подобныхъ фактовъ Кулонъ и предложилъ гипотезу, по которой раздѣленіе магнитныхъ жидкостей при намагничиваніи тѣла происходитъ въ каждой отдѣльной частицѣ этого тѣла. Онъ предположилъ невозможнымъ переходъ магнитныхъ жидкостей съ одной частицы тѣла на другую, сосѣднюю съ первой. Итакъ, *по гипотезѣ Кулона, каждая молекула намагниченнаго тѣла является цѣльнымъ магнитикомъ, проявляющимъ полярность, т. е. обнаруживающимъ на своихъ обоихъ концахъ противоположные магнетизмы.* Кулонъ показалъ на опытѣ, что соединеніе другъ съ другомъ противоположными полюсами нѣсколькихъ намагниченныхъ стальныхъ параллелепипедовъ создаетъ одинъ магнитъ съ противоположными магнетизмами на обоихъ его половинахъ. Кулонъ смотрѣлъ, однако, на свою гипотезу не какъ на выраженіе истиннаго смысла магнитныхъ явленій, но исключительно

лишь какъ на средство, которое даетъ возможность объяснять явленія и производить количественные расчеты. «*Какова бы ни была причина магнитныхъ явленій, всѣ эти явленія могутъ быть объяснены и подвергнуты подсчету, если мы предположимъ въ частицахъ стали присутствіе двухъ магнитныхъ жидкостей, причемъ допустимъ, что частицы одной и той же жидкости взаимно отталкиваютъ другъ друга съ силою, измѣняющеюся обратно пропорціонально квадрату разстоянію между этими частицами,* и *что частицы двухъ различныхъ жидкостей взаимно притягиваютъ другъ друга по тому же закону*». Такъ говоритъ въ своемъ знаменитомъ мемуарѣ Кулонъ.

Большая простота закона Кулона, полное подобіе его закону всемірнаго тяготѣнія — все это дало возможность построенія изящной въ математическомъ отношеніи теоріи магнетизма. Гринъ [1]), Гауссъ [2]), Пуассонъ [3]), знаменитые математики первой половины настоящаго столѣтія, положили не мало труда на созданіе математической теоріи магнетизма. Но, какъ ни изящна эта теорія въ математическомъ отношеніи, собственно для физики, для развитія знанія о магнитныхъ явленіяхъ эта теорія дала весьма мало. Ни одного новаго факта не было предсказано этой теоріей. Быть можетъ даже, хорошая математическая обработка этой теоріи слишкомъ подкупала въ пользу ея и потому служила долгое время помѣхою къ примѣненію другого ученія, въ основѣ отрицавшаго допущеніе непосредственнаго дѣйствія на разстояніи.

Резюмирую вкратцѣ наиболѣе существенныя свѣдѣнія, какія извѣстны намъ о магнитахъ. Какъ уже было сказано, два магнита, находясь одинъ отъ другого на разстояніи, дѣйствуютъ другъ на друга. Если оба магнита очень длинны, такъ что замѣтное дѣйствіе можетъ быть только между однимъ концомъ одного и однимъ концомъ другого, то, какъ это уже доказалъ своими опытами Кулонъ, такое дѣйствіе между концами двухъ магнитовъ измѣняется, съ измѣненіемъ разстоянія между этими концами, обратно пропорціонально квадрату разстоянія. Это дѣй-

[1]) Гринъ родился въ 1793 г., умеръ въ 1841 г.

[2]) Гауссъ родился въ 1771 г. въ Брауншвейгѣ, умеръ въ 1855 г. въ Геттингенѣ.

[3]) Пуассонъ родился въ 1782 г., умеръ въ 1840 г. въ Парижѣ.

ствіе будетъ взаимнымъ отталкиваніемъ концовъ магнита, когда эти концы одноименны, и оно будетъ взаимнымъ притяженіемъ, когда концы разноименны. Сложнѣе выражается законъ взаимодѣйствія двухъ магнитовъ въ томъ случаѣ, когда эти магниты не очень длинны, т. е. когда оба конца одного магнита могутъ оказывать чувствительное вліяніе на оба конца другого. Теорія, основанная на принятіи закона Кулона въ основу расчетовъ, а также и непосредственныя наблюденія показываютъ, что два сравнительно короткихъ магнита, расположенныхъ не близко другъ къ другу, оказываютъ другъ на друга вращательное дѣйствіе, т. е. одинъ магнитъ стремится повернуть другой, и это дѣйствіе измѣняется (весьма приблизительно) обратно пропорціонально кубу разстоянія между центрами магнитовъ.

Кусокъ желѣза или стекла притягивается магнитомъ не только тогда, когда онъ находится очень близко къ этому магниту. Онъ замѣтно притягивается магнитомъ и тогда, когда удаленъ отъ него на довольно значительное разстояніе. Въ обоихъ этихъ случаяхъ кусокъ желѣза или стали самъ превращается въ магнитъ, при чемъ его магнитныя свойства становятся интензивнѣе по мѣрѣ приближенія къ магниту и достигаютъ наибольшаго развитія, когда онъ пристанетъ къ тому или другому концу магнита. Послѣ отрыванія и удаленія стали или желѣза отъ магнита въ нихъ сохраняются магнитныя свойства, но далеко не въ одинаковой степени въ различныхъ сортахъ этихъ металловъ. Въ стали, послѣ удаленія ея отъ магнита, магнитныя свойства обнаруживаются весьма рѣзко, въ твердомъ желѣзѣ они проявляются слабѣе, въ очень мягкомъ желѣзѣ наблюдается только слѣды этихъ свойствъ. Совершенно обратное получается при дѣйствіи магнита на желѣзо и сталь. Чѣмъ мягче кусокъ желѣза, тѣмъ сильнѣе въ немъ возбуждается *«временное намагниченіе»*, т. е. тѣмъ рѣзче обнаруживаются особенности магнита въ этомъ кускѣ желѣза, когда онъ находится подъ вліяніемъ другого магнита. Наименѣе сильное временное намагниченіе получается въ стали. Благодаря такому различію въ интензивности временного намагниченія желѣза и стали при дѣйствіи на нихъ, при одинаковыхъ условіяхъ, одного и того же магнита и происходитъ то, что желѣзо сильнѣе пристаетъ къ магниту, чѣмъ сталь. Оторвать кусокъ мягкаго желѣза отъ конца магнита го-

раздо труднѣе, чѣмъ оторвать отъ этого же конца магнита кусокъ стали, по формамъ и размѣрамъ одинаковый съ кускомъ желѣза.

Натираніе стального стержня или полосы концомъ магнита, производимое нѣсколько разъ въ одномъ направленіи — отъ одного конца стержня или полосы къ другому, сообщаетъ имъ болѣе сильное намагниченіе, чѣмъ простое прикосновеніе ихъ къ магниту. Такимъ способомъ, т. е. при помощи натиранія, и могутъ быть приготовляемы искусственные магниты. Для приготовленія хорошихъ, сильныхъ и постоянныхъ магнитовъ, сохраняющихъ свои свойства безъ чувствительнаго ослабленія долгое время, употребляется сталь, содержащая въ видѣ примѣси около 3% металла вольфрама. Полосы изъ такой стали подвергаются сначала сильной закалкѣ, а затѣмъ ихъ въ теченіе 20—30 часовъ «отпускаютъ» при 100°, т. е. держатъ въ теченіе этого времени въ парахъ кипящей воды. Прикосновеніе желѣза или стали къ хорошему постоянному магниту или даже натираніе стальныхъ полосъ этимъ магнитомъ, т. е. сообщеніе такимъ путемъ магнитныхъ свойствъ многимъ тѣламъ, не отражается особенно сильно на магнитныхъ свойствахъ самаго магнита. Если только магнитъ приготовленъ изъ хорошей вольфрамовой стали, достаточно закаленной и потомъ отпущенной, свойства его весьма мало ослабляются отъ намагничиванія этимъ магнитомъ другихъ кусковъ стали или желѣза. Очень точныя изслѣдованія обнаруживаютъ однако, что приближеніе къ самому лучшему магниту куска желѣза или стали не остается безъ всякаго дѣйствія на этотъ магнитъ. Эти изслѣдованія показываютъ, что такое приближеніе желѣза къ магниту вліяетъ на силу, съ которою въ какой нибудь части своей поверхности этотъ магнитъ дѣйствуетъ на подносимый сюда кусочекъ желѣза или другой маленькій магнитъ, т. е. при этомъ происходитъ какъ бы измѣненіе въ распредѣленіи магнетизма по поверхности магнита. Отъ этого то явленія въ магнитѣ и зависитъ дѣйствіе телефона. Какъ было уже замѣчено, приближеніе или даже прикосновеніе желѣза или стали къ магниту и затѣмъ удаленіе этихъ металловъ отъ него не сопровождается чувствительнымъ измѣненіемъ свойствъ магнита. Но, однако, такъ будетъ только при нечастыхъ прикосновеніяхъ. Въ самомъ дѣлѣ многократныя,

частыя прикосновенія желѣза къ магниту вызываютъ въ послѣднемъ уже замѣтное ослабленіе магнитныхъ свойствъ. Такъ же точно производятъ ослабленіе намагниченія удары и сотрясенія магнита. Напротивъ, удары и сотрясенія стальной полосы *во время* намагничиванія ея, т. е. при натираніи ея магнитомъ, способствуютъ болѣе сильному намагниченію. Измѣненія температуры оказываютъ также существенное вліяніе на магниты. Нагрѣваніе самаго лучшаго стального магнита сопровождается всегда нѣкоторою потерею въ его магнитныхъ свойствахъ. При охлажденіи до первоначальной температуры эти свойства снова усиливаются, но, если нагрѣваніе было значительное, то магнитъ послѣ охлажденія не получается вполнѣ такимъ, какимъ онъ былъ до нагрѣванія, а является до извѣстной степени ослабленнымъ. Вообще, чѣмъ выше температура нагрѣванія магнита, тѣмъ и бо́льшія измѣненія претерпѣваетъ онъ. При температурѣ, нѣсколько низшей температуры кипѣнія миндальнаго масла, стальной магнитъ теряетъ почти вполнѣ свой магнетизмъ. Но при этой температурѣ и при температурахъ, болѣе высокихъ, сталь все таки обнаруживаетъ магнитныя свойства, когда къ ней подносится другой магнитъ, т. е. она притягивается этимъ магнитомъ. При такихъ температурахъ сталь по своимъ магнитнымъ свойствамъ является подобною желѣзу, изслѣдуемому при обыкновенной комнатной температурѣ. Въ ней такъ же, какъ и въ желѣзѣ, возбуждается временное намагниченіе, которое тотчасъ исчезаетъ, какъ только уничтожается причина, производящая намагниченіе. Сталь, доведенная до оранжеваго каленія, теряетъ всякую способность проявлять магнитныя свойства. Въ кускахъ магнитнаго желѣзняка, т. е. въ такъ называемыхъ естественныхъ магнитахъ, магнитныя свойства исчезаютъ при темнокрасномъ каленіи.

Пониженіе температуры магнита производитъ, какъ и нагрѣваніе, ослабленіе намагниченія. При очень значительномъ охлажденіи магнита, его намагниченіе уменьшается весьма сильно. Измѣненія магнита, происходящія при измѣненіи температуры, получаются тѣмъ меньше, чѣмъ большее число разъ передъ этимъ магнитъ подвергался перемѣнамъ температуры. Послѣ большаго числа нагрѣваній и охлажденій магнитъ становится болѣе постояннымъ, онъ меньше чувствуетъ дѣйствіе тепла.

Самые лучшіе стальные магниты не представляются однако абсолютно постоянными. Съ теченіемъ времени, несмотря на полный покой и постоянство температуры магнитовъ, замѣчается нѣкоторое ослабленіе намагниченія. Но это измѣненіе однако весьма мало и можетъ быть обнаружено только при помощи особенно тщательныхъ пріемовъ изслѣдованія, спустя очень продолжительное время послѣ изготовленія магнитовъ.

До сихъ поръ я говорилъ только про дѣйствіе магнитовъ на желѣзо и сталь, а также, когда упоминалъ о магнитѣ, то имѣлъ въ виду или стальной магнитъ, или такъ называемый естественный магнитъ, т. е. кусокъ магнитнаго желѣзняка, особой желѣзной руды, въ изобиліи имѣющейся у насъ на Уралѣ. Но магнитъ притягиваетъ къ себѣ не только желѣзо и сталь. Чугунъ испытываетъ на себѣ дѣйствіе магнита, совершенно подобное тому дѣйствію, какое испытываетъ желѣзо. Въ этомъ отношеніи нѣтъ существенной разницы между желѣзомъ и чугуномъ. Разница между этими тѣлами по отношенію къ ихъ магнитнымъ свойствамъ только количественная. Такъ же точно относятся къ магниту и два другихъ металла: никкель и кобальтъ. Уже давно извѣстно, что два эти металла притягиваются магнитомъ, обращаясь при этомъ сами въ магниты, что вообще два эти металла по своему отношенію къ магниту являются вполнѣ подобными стали. Изъ никкеля или кобальта могутъ быть даже приготовлены постоянные магниты, которые во всѣхъ своихъ дѣйствіяхъ представляются вполнѣ схожими со слабыми стальными магнитами. Здѣсь передъ вами магнитная стрѣлка, которая по виду ничѣмъ не отличается отъ обыкновенной магнитной стрѣлки. Помѣщенная на остріѣ, она устанавливается въ магнитномъ меридіанѣ, она отклоняется при поднесеніи къ ней магнита, притягивается желѣзомъ. Но эта магнитная стрѣлка не стальная, она—изъ никкеля. Давно было извѣстно также свойство магнитовъ притягивать къ себѣ многіе минералы, содержащіе въ своемъ составѣ соли желѣза, никкеля или кобальта. Въ семидесятыхъ годахъ прошлаго столѣтія Бругмансъ замѣтилъ совсѣмъ противоположное дѣйствіе магнита на металлъ висмутъ. Бругмансъ нашелъ, что магнитъ отталкиваетъ отъ себя этотъ металлъ. Впослѣдствіи оказалось, что подобное же дѣйствіе магнита испытываетъ на себѣ, кромѣ висмута, еще и сурьма. Въ 1845 году знаменитый Михаилъ Фа-

радэй [1]) своими классическими опытами доказалъ, что магнитныя свойства присущи всѣмъ тѣламъ природы твердымъ, жидкимъ, газообразнымъ, неорганическимъ и органическимъ. Всѣ тѣла испытываютъ дѣйствіе магнита, при чемъ одни притягиваются имъ, другія, напротивъ, отталкиваются. Но магнитныя свойства почти всѣхъ тѣлъ проявляются настолько слабо, что для обнаруженія ихъ приходится примѣнять особыя средства. Мы познакомимся съ этимъ нѣсколько позже.

---

[1]) Михаилъ Фарадэй родился въ Лондонѣ въ 1791 г., умеръ въ Hampton Court (на юго-западѣ отъ Лондона) въ 1867 г.

Лекція 2-я.

Перехожу къ разсмотрѣнію явленій, вполнѣ подобныхъ тѣмъ, какія наблюдаются при употребленіи обыкновенныхъ магнитовъ, но явленія, о которыхъ будетъ рѣчь теперь, вызываются не магнитами, а электрическимъ токомъ. До 1820 г. не знали ничего объ этихъ «магнитныхъ» явленіяхъ, а до 1799 г. не имѣли даже и средствъ возбудить какое либо изъ нихъ въ достаточно интензивной степени. Вѣдь только благодаря открытію «*Вольтова столба*»,— открытію, произведенному въ 1799 г., сталъ извѣстенъ источникъ электрическаго тока, во много разъ превосходящій по своей мощности тѣ средства полученія этого тока, какія имѣлись до того времени, т. е. электрическія машины. Великое открытіе Александра Вольты[1]) положило начало всѣмъ нашимъ знаніямъ дѣйствій и свойствъ электрическаго тока; оно дало возможность приступить къ изученію этого явленія. Зимою 1820 г. Эрстедъ[2]) замѣтилъ, что проволока, соединяющая собою два полюса батареи, составленной изъ нѣсколькихъ Вольтовыхъ элементовъ, оказываетъ дѣйствіе на магнитную стрѣлку, когда эта стрѣлка находится недалеко отъ проволоки. Такая проволока выводитъ магнитную стрѣлку изъ ея положенія равновѣсія въ магнитномъ меридіанѣ и, не вызывая поступательнаго движенія, заставляетъ стрѣлку отклоняться на большій или меньшій уголъ отъ этого положенія. Такимъ образомъ *Эрстеду впервые удалось подмѣтить одно изъ магнитныхъ дѣйствій тока*. Почти непосредственно вслѣдъ за сдѣланнымъ въ засѣданіи Французской Академіи сообщеніи о важномъ открытіи Эрстеда, Араго[3]), которому и принадлежало это сообщеніе, прочелъ 25 сентября 1820 г. докладъ о другомъ не менѣе важномъ открытіи, сдѣланномъ уже имъ самимъ. Араго замѣтилъ, что прово-

---

[1]) Александръ Вольта родился въ Комо въ 1745 г., умеръ тамъ же въ 1827 г.

[2]) Эрстедъ родился въ Даніи въ 1777 г., умеръ тамъ же въ 1851 г.

[3]) Араго родился около Перпиньяна въ 1786 г., умеръ въ Парижѣ въ 1853 г.

лока, по которой проходитъ токъ отъ вольтаическаго элемента [1]) притягиваетъ къ себѣ, совершенно подобно магниту, желѣзные опилки. Этотъ подмѣченный имъ фактъ привелъ его къ заключенію *о намагниченіи желѣзныхъ опилковъ подъ вліяніемъ проходящаго вблизи ихъ электрическаго тока.* Произведенные опыты вполнѣ подтвердили такое заключеніе Араго. Эти опыты показали, что при пропусканіи электрическаго тока чрезъ катушки, сдѣланныя изъ мѣдной проволоки, намагничивались желѣзныя и стальныя проволоки, вложенныя въ эти катушки. Такимъ путемъ, т. е. при помощи электрическаго тока, проходящаго по катушкѣ, Араго вервые обратилъ нѣсколько стальныхъ вязательныхъ иглъ въ постоянные магниты. Нѣсколько позже, 6 ноября того же 1820 года, Араго сообщилъ Французской Академіи, что и разрядъ лейденской банки, произведенный чрезъ обмотку катушки, вызываетъ намагниченіе стали, находящейся внутри этой катушки. Независимо отъ Араго и въ то же самое время явленіе намагниченія стали и желѣза при посредствѣ электрическаго тока было подмѣчено Дэви.

Одновременно съ докладами Араго о намагничивающемъ дѣйствіи электрическаго тока происходили во Французской Академіи чтенія отчетовъ Ампера [2]) объ опытахъ, которые привели этого знаменитаго ученаго къ открытію обширной области совершенно новыхъ явленій, обнаружившихъ вполнѣ новыя свойства электрическаго тока. Опыты Ампера, имѣвшіе въ началѣ цѣлью болѣе детальное изслѣдованіе того, что было найдено Эрстедомъ, не только вполнѣ подтвердили магнитное дѣйствіе тока и дали возможность установить правило, которому подчиняется въ какомъ угодно случаѣ это дѣйствіе *(если наблюдатель, вообразивъ себя расположеннымъ по направленію электрическаго тока такъ, чтобы токъ имѣлъ направленіе отъ его ногъ къ головѣ, въ этомъ своемъ положеніи повернетъ лицо къ магниту, онъ будетъ видѣть отклоненіе сѣвернаго полюса происходящимъ всегда влѣво)*, но и дали возможность значительно расширить предѣлы нашихъ знаній объ явленіяхъ электричества и

[1]) Будемъ называть источникъ тока элементъ — *вольтаическимъ*, а не *гальваническимъ*, какъ это обыкновенно дѣлаютъ; вѣдь Вольта изобрѣлъ элементъ, а не Гальвани, который только подмѣтилъ явленіе электризаціи при соприкосновеніи разнородныхъ проводниковъ и совершенно неправильно интерпретировалъ это явленіе.

[2]) Амперъ родился въ Ліонѣ въ 1775 г., умеръ въ Марсели въ 1836 г.

магнетизма. Эти опыты, на которые Амперъ употребилъ не болѣе 2-хъ мѣсяцевъ (отчеты о своихъ работахъ Амперъ читалъ 18, 25 сентября, 9, 16, 30 октября и 6 ноября), создали особый отдѣлъ науки объ электричествѣ, получившій названіе «*Электродинамика*». Они показали, что проводники, по которымъ проходятъ электрическіе токи, механически дѣйствуютъ другъ на друга, притягиваютъ или отталкиваютъ одинъ другого или оказываютъ другъ на друга вращательное дѣйствіе, что при этомъ условіи проводники испытываютъ на себѣ дѣйствіе обыкновенныхъ магнитовъ и даже дѣйствіе земного магнетизма, что, наконецъ, когда этимъ проводникамъ придана форма прямыхъ катушекъ, они по тѣмъ дѣйствіямъ, какія оказываютъ другъ на друга, на магниты, или какія сами испытываютъ отъ этихъ магнитовъ и земного магнетизма, ничемъ не отличаются отъ извѣстныхъ намъ магнитовъ, что такія катушки съ проходящимъ по нимъ токомъ являются только какъ бы разновидностью обыкновенныхъ магнитовъ. Я демонстрирую передъ вами главнѣйшіе опыты Ампера. На этомъ штативѣ подвѣшенъ проводникъ въ видѣ четыреугольника ABCDEF. Этотъ четыреугольникъ не замкнутъ. Мѣдная проволока, изъ которой приготовленъ этотъ четыреугольникъ, отогнута подъ прямымъ угломъ въ точкахъ A и F. Затѣмъ два конца проволоки согнуты въ видѣ дужекъ, къ которымъ придѣланы

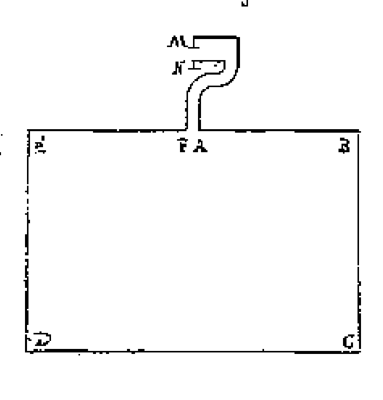


Рис. 2.

маленькія острія M и N. На этихъ остріяхъ четыреугольникъ покоится въ двухъ маленькихъ желѣзныхъ чашечкахъ, наполненныхъ ртутью. При помощи стержней штатива эти ртутныя чашечки могутъ быть соединены съ полюсами вольтаическаго элемента, а слѣдовательно по подвѣшенному проводнику можетъ быть пропущенъ токъ. Я замыкаю токъ и подношу къ правой вертикальной сторонѣ четыреугольника вертикальный прямолинейный проводникъ, введенный вмѣстѣ съ четыреугольникомъ въ одну и ту же цѣпь тока. Вы видите, четыреугольникъ повертывается. Его правая вертикальная сторона притягивается поднесеннымъ проводникомъ. Я повертываю прямолинейный проводникъ, т. е. дѣлаю такъ, что та часть его, которая была раньше

снизу, оказывается теперь наверху, и снова подношу его къ той же правой сторонѣ четыреугольника. Четыреугольникъ опять повертывается, но повертывается въ обратную сторону. Вы наблюдаете теперь отталкиванiе правой вертикальной стороны четыреугольника отъ поднесеннаго къ ней прямолинейнаго проводника. Я подношу теперь этотъ прямой проводникъ къ лѣвой вертикальной сторонѣ четыреугольника. Вы видите, эта часть притягивается прямымъ проводникомъ. Я снова повертываю прямой проводникъ и подношу его опять къ лѣвой вертикальной сторонѣ четыреугольника. Теперь вы наблюдаете отталкиванiе. Я повторяю опытъ. Подношу прямой проводникъ къ правой сторонѣ четыреугольника и вызываю тѣмъ притяженiе ея. При помощи имѣющагося на этомъ штативѣ коммутатора я измѣняю направленiе тока въ четыреугольникѣ, причемъ направленiе тока въ прямомъ проводникѣ остается безъ перемѣны, прежнее. Вы видите, измѣненiе направленiя тока въ четыреугольникѣ имѣло слѣдствiемъ противоположное дѣйствiе поднесеннаго проводника на четыреугольникъ. Сторона четыреугольника оттолкнулась отъ поднесеннаго проводника. Если бы мы прослѣдили направленiе тока въ нашей цѣпи, то тѣ опыты, которые мы видѣли, подтвердили бы заключенiе, къ которому пришелъ Амперъ, а это заключенiе слѣдующее:

Два электрическихъ тока взаимно притягиваются, когда они параллельны между собою и направлены въ одну и ту же сторону; два электрическихъ тока взаимно отталкиваются, когда направленiя ихъ параллельны, но при этомъ прямо противоположны.

Я подношу теперь прямолинейный проводникъ, держа его горизонтально, къ нижней сторонѣ четыреугольника и помѣщаю его подъ угломъ къ этой сторонѣ. Вы видите, четыреугольникъ повертывается. Я измѣняю направленiе тока въ четыреугольникѣ. Четыреугольникъ повертывается въ другую сторону. Прослѣдивъ направленiе тока, мы получили бы опять подтвержденiе другого положенiя, выведеннаго изъ своихъ опытовъ Амперомъ:

Два проводника, по которымъ проходятъ электрическiе токи и которые могутъ только вращаться во взаимно параллельныхъ плоскостяхъ, стремятся установиться параллельно другъ другу и при томъ такъ, что направленiя токовъ въ ихъ обоихъ получаются одинаковыя.

Замѣчу, что самый терминъ *«электрическій токъ»*, столь извѣстный въ настоящее время, введенъ въ науку Амперомъ. Терминомъ «электрическій токъ» Амперъ предложилъ называть явленіе, какое происходитъ въ проводникахъ и въ самомъ вольтаическомъ элементѣ, когда этотъ элементъ замыкается проводниками или, общнѣе, то явленіе, какое происходитъ въ проводникѣ, когда послѣдній соединяется на своихъ концахъ съ тѣлами, въ которыхъ дѣйствуютъ электродвижущія силы. Амперъ установилъ и понятіе *о направленіи электрическаго тока въ проводникѣ*,—понятіе, которое является теперь общепринятымъ: токъ въ проводникѣ имѣетъ направленіе отъ конца, соединеннаго съ положительно наэлектризованнымъ полюсомъ вольтаическаго элемента (мѣдь въ элементѣ Вольты), къ другому концу этого проводника, соединенному съ отрицательно наэлектризованнымъ полюсомъ элемента (цинкъ въ элементѣ Вольты).

Я замѣняю теперь элементъ болѣе сильнымъ источникомъ тока. Я беру батарею изъ нѣсколькихъ аккумуляторовъ. Отъ этой батареи я пропускаю токъ по подвижному четыреугольнику. Какъ только я замыкаю токъ, четыреугольникъ, какъ вы видите, приходитъ въ движеніе. Послѣ нѣсколькихъ качаній четыреугольникъ успокаивается, расположившись своею плоскостью перпендикулярно направленію магнитнаго меридіана. Я измѣняю направленіе тока въ четыреугольникѣ. Четыреугольникъ выходитъ изъ своего положенія равновѣсія, повертывается на 180^0 и снова устанавливается своею плоскостью перпендикулярно магнитному меридіану. Въ томъ и другомъ случаѣ направленіе тока для наблюдателя, смотрящаго на проводникъ съ сѣверной стороны, представляется одинаковымъ. Это направленіе обратно противоположно направленію движенія часовой стрѣлки. Итакъ, вы видите, что этотъ подвѣшенный четыреугольный проводникъ съ проходящимъ по немъ токомъ извѣстнымъ образомъ оріентируется въ пространствѣ и, будучи выведенъ изъ положенія равновѣсія, стремится вновь принять свое прежнее положеніе. Что же заставляетъ его устанавливаться въ вполнѣ опредѣленномъ азимутѣ? Причина этому земной магнетизмъ. На опытѣ, который я продѣлаю потомъ, вы увидите еще яснѣе, что проводникъ съ токомъ, какъ и обыкновенный магнитъ, чувствуетъ дѣйствіе земли, т. е., лучше сказать, чувствуетъ дѣйствіе того, что мы называемъ магнетизмомъ земли. Я подношу къ этому

четыреугольнику магнитъ. Вы замѣчаете, съ какою силою дѣйствуетъ поднесенный конецъ магнита на этотъ четыреугольникъ съ токомъ! Я измѣняю направленіе тока въ проводникѣ. Проводникъ быстро измѣняетъ свое положеніе. Прежде онъ отталкивался магнитомъ, теперь онъ весьма сильно притягивается имъ. Явленіе, которое вы наблюдали сейчасъ, представляетъ собою явленіе, обратное тому, какое замѣтилъ Эрстедъ. Эрстедъ нашелъ, что проводникъ съ токомъ дѣйствуетъ на магнитъ. Сейчасъ вы видѣли, что и магнитъ оказываетъ дѣйствіе на проводникъ съ токомъ. Итакъ, дѣйствіе между магнитомъ и проводникомъ съ токомъ — взаимное. Къ этому явленію мы можемъ примѣнить законъ Ньютона: *дѣйствіе равно противодѣйствію.* — Я перевертываю магнитъ и подношу къ четыреугольнику другой конецъ магнита. Прежде я подносилъ сѣверный, теперь подношу южный. Вы видите, что этотъ южный конецъ магнита заставляетъ проводникъ съ токомъ отклоняться въ противоположную сторону той, въ которую отклонялся проводникъ отъ сѣвернаго конца магнита. Итакъ, *направленіе силы, испытываемой проводникомъ съ токомъ отъ конца магнита, зависитъ отъ направленія тока въ проводникѣ и отъ знака конца магнита.* Оно и должно быть такъ, если мы примемъ во вниманіе то, что̀ нашелъ Эрстедъ, а, кромѣ того, примемъ во вниманіе и законъ Ньютона.

Перехожу къ новому опыту. Здѣсь на длинной нити подвѣшена своею осью горизонтально прямая катушка, приготовленная изъ довольно толстой мѣдной изолированной проволоки. Концы обмотки этой катушки направлены сначала назадъ вдоль катушки къ ея серединѣ, а затѣмъ отогнуты подъ прямымъ угломъ внизъ. Одинъ конецъ, на самой серединѣ катушки, опущенъ въ ртутную чашечку, другой конецъ опущенъ въ кольцевой жолобъ, окружающій собою ртутную чашечку и также наполненный ртутью. При помощи этой чашечки и этого жолоба я ввожу подвѣшанную катушку въ цѣпь тока, который можетъ получиться отъ батареи изъ нѣсколькихъ аккумуляторовъ. Въ ту же цѣпь я ввожу другую катушку, подобную первой, но не подвѣшанную. Я замыкаю токъ. Вы видите, катушка тотчасъ выходитъ изъ прежняго своего положенія и устремляется притти въ другое, новое положеніе. Она совершаетъ колебанія около этого положенія и, наконецъ, приходитъ

въ покой. Я рукою отклонилъ ее изъ этого положенія. Но, какъ только я отнялъ отъ нея свою руку, она устремилась назадъ въ то положеніе, въ которое была приведена раньше. Эта катушка колеблется около своего положенія совершенно такъ, какъ колеблется магнитъ. Посмотрите на положеніе, какое занимаетъ катушка. Эта катушка параллельна стоящей здѣсь на столѣ магнитной стрѣлкѣ. *Ось катушки устанавливается въ магнитномъ меридіанѣ.*

Если бы мы прослѣдили направленіе тока въ катушкѣ, то нашли бы, что *катушка обращается къ сѣверу тѣмъ своимъ концомъ, направленіе тока въ которомъ для наблюдателя, повернувшагося лицомъ къ этому концу, представляется обратнымъ движенію часовой стрѣлки.*

Я измѣняю направленіе тока во всей цѣпи, а слѣдовательно и въ подвѣшенной катушкѣ. Вы видите, катушка тотчасъ же повертывается на 180° и обращается къ сѣверу тѣмъ концомъ, который раньше былъ направленъ къ югу. Понятно, что и теперь для наблюдателя, смотрящаго на конецъ катушки, обращенный къ сѣверу, токъ представляется въ направленіи, обратномъ движенію часовой стрѣлки.

Я подношу къ *сѣверному* концу катушки сѣверный полюсъ магнита. Вы наблюдаете рѣзкое отталкиваніе конца катушки отъ полюса магнита. Я подношу сѣверный полюсъ магнита къ *южному* концу катушки. Теперь вы наблюдаете сильное притяженіе. Я перевертываю магнитъ и подношу южный полюсъ магнита сначала къ одному, потомъ къ другому концу катушки. Получается дѣйствіе, прямо противоположное первому. Я беру вмѣсто магнита другую катушку, т.-е. катушку, которая вмѣстѣ съ подвѣшенной введена въ цѣпь тока. Я подношу одинъ конецъ этой катушки къ сѣверному концу магнита, который горизонтально подвѣшенъ на нити. Вы видите, сѣверный полюсъ магнита отталкивается концомъ катушки. Я подношу тотъ же конецъ катушки къ южному полюсу магнита. Южный полюсъ магнита притягивается концомъ катушки. Итакъ, здѣсь мы наблюдаемъ явленіе, обратное тому, которое наблюдали только что передъ этимъ. Я подношу теперь конецъ катушки къ сѣверному концу подвѣшенной катушки. Вы видите, происходитъ отталкиваніе катушки, совершенно подобное отталкиванію магнита. Я под-

ношу этотъ же конецъ катушки къ другому южному концу подвѣшенной катушки. И, какъ въ опытѣ съ магнитомъ, вы замѣчаете теперь противоположное дѣйствіе. Я приближаю къ подвѣшенной катушкѣ горизонтальный прямолинейный проводникъ, который введенъ въ цѣпь тока. Вы видите, проводникъ съ токомъ отклоняетъ катушку, совершенно такъ же, какъ онъ отклоняетъ подвѣшенный магнитъ. Итакъ, *катушка съ проходящимъ по ней токомъ по всѣмъ тѣмъ дѣйствіямъ, какія она испытываетъ отъ магнита, отъ проводника, по которому проходитъ токъ, отъ земного магнетизма, а также и по тѣмъ дѣйствіямъ, какія она оказываетъ на магнитъ, на другую катушку съ токомъ и, наконецъ, на какой-либо другой проводникъ съ токомъ, является вполнѣ подобною прямому магниту.* Если бы мы опредѣлили въ каждомъ отдѣльномъ опытѣ направленіе тока въ катушкѣ, то мы пришли бы къ заключенію, что *конецъ катушки, въ которомъ токъ для наблюдателя, смотрящаго на этотъ конецъ, представляется имѣющимъ направленіе, обратное движенію часовой стрѣлки, является по своимъ дѣйствіямъ одинаковымъ съ сѣвернымъ концомъ магнита.*

Катушка съ проходящимъ по ней токомъ, подобна магниту, не только качественно, но и количественно. Мы всегда можемъ вообразить себѣ въ соотвѣтственно приготовленной катушкѣ токъ такой силы, что всѣ внѣшнія дѣйствія этой катушки, т.-е. дѣйствія на какой-нибудь магнитъ, на какой-либо прямой проводникъ или, наконецъ, на другую катушку съ токомъ будутъ и *количественно* одинаковы съ дѣйствіями, оказываемыми даннымъ магнитомъ. Такая катушка будетъ, по своимъ внѣшнимъ дѣйствіямъ, *эквивалентна* данному магниту.

Опыты, подобные только что показаннымъ, а также и теоретическіе расчеты различныхъ дѣйствій между электрическими токами, названныхъ Амперомъ *электродинамическими дѣйствіями*, дали возможность этому ученому высказать слѣдующія положенія.

Всѣ явленія, вызываемыя взаимодѣйствіями электрическаго тока и магнита, т.-е. вызываемыя такъ называемыми электромагнитными силами, можно разсматривать, какъ слѣдствія *электродинамическихъ дѣйствій*, какія происходятъ между даннымъ проводникомъ съ электрическимъ токомъ и системою воображаемыхъ замкнутыхъ электрическихъ токовъ въ стали магнита. Эта

система замкнутыхъ токовъ, безконечно малыхъ размѣровъ и расположенныхъ своими плоскостями подъ прямымъ угломъ къ такъ называемой «магнитной оси» магнита, и составляетъ то, что̀ обыкновенно называютъ магнитомъ. Итакъ, магнитныя свойства тѣла обязаны существованію около его частичекъ замкнутыхъ электрическихъ токовъ. Намагниченіе тѣла—это ничто иное, какъ приведеніе въ порядокъ такихъ элементарныхъ замкнутыхъ электрическихъ токовъ, расположеніе ихъ плоскостей параллельно другъ другу и перпендикулярно оси магнита.

При этомъ направленіе этихъ токовъ въ магнитѣ таково, что, когда магнитъ находится въ горизонтальномъ положеніи въ магнитномъ меридіанѣ, эти токи представляются прямопротивоположными видимому движенію солнца.

Такими же электродинамическими дѣйствіями можно объяснить всѣ тѣ силы, какія наблюдаются между двумя магнитами. Этими же дѣйствіями объясняются и тѣ силы, какія испытываетъ замкнутый проводникъ съ проходящимъ по немъ электрическимъ токомъ непосредственно отъ вліянія земли. Для этого достаточно допустить въ земномъ шарѣ существованіе замкнутыхъ электрическихъ токовъ, имѣющихъ расположеніе, при которомъ плоскости этихъ токовъ перпендикулярны направленію магнита инклинатора въ данномъ мѣстѣ, а направленіе токовъ обратно видимому движенію солнца.

Вообще всѣ магнитныя дѣйствія тождественны съ электродинамическими дѣйствіями и между сѣвернымъ и южнымъ полюсами магнита нѣтъ никакого существеннаго отличія. Вся разница между этимъ полюсомъ заключается лишь въ ихъ положеніи относительно электрическихъ токовъ, отъ которыхъ зависятъ «магнитныя свойства» магнита.

Таковы основныя положенія теоріи Ампера, объединившей собою столь отличныя другъ отъ друга явленія, электрическія и магнитныя, давшей возможность оба класса этихъ явленій отнести къ одной и той же причинѣ. Эта теорія, въ своей полной и изящнѣйшей математической обработкѣ опубликованная Амперомъ въ 1823 г., построена на допущеніи дѣйствія на разстояніи (*actio in distans*), т.-е. на томъ же принципѣ, на которомъ развиты теорія всемірнаго тяготѣнія Ньютона и теорія магнитныхъ и электрическихъ явленій Гаусса-Пуассона. Во всѣхъ

этихъ теоріяхъ не принимается во вниманіе среда, отдѣляющая собою тѣла, дѣйствующія другъ на друга. Взаимодѣйствія этихъ тѣлъ предполагаются происходящими непосредственно на разстояніи, совершенно независимо отъ какого бы то ни было участія среды, заполняющей пространство между данными тѣлами. Мы увидимъ, что существуетъ иное воззрѣніе на природу электрическихъ и магнитныхъ явленій, воззрѣніе, по которому во всѣхъ этихъ явленіяхъ промежуточная среда играетъ первенствующую роль.

Я сказалъ, что всегда можно вообразить себѣ такую катушку съ токомъ, которая въ своихъ внѣшнихъ дѣйствіяхъ будетъ эквивалентна данному магниту. Но, если мы возьмемъ обыкновенную прямую катушку и подобный ей по формѣ магнитъ, т. е. намагниченный стальной цилиндръ, то мы замѣтимъ существенную разницу въ дѣйствіяхъ катушки и магнита въ пространствахъ, которыя заключаются внутри оборотовъ катушки и внутри намагниченнаго цилиндра. Внутри катушки мы наблюдаемъ весьма сильное магнитное дѣйствіе, во внутренней полости намагниченнаго цилиндра магнитное дѣйствіе, напротивъ, является весьма слабымъ. Здѣсь, передъ вами, стальная трубка, довольно сильно намагниченная. Я подношу къ ней желѣзную проволоку. Желѣзная проволока притягивается концомъ трубки и не имѣетъ стремленія быть втянутою внутрь трубки. Не то мы будемъ наблюдать, если возьмемъ катушку, по которой проходитъ токъ. Желѣзная проволока или желѣзный цилиндръ, поднесенные къ такой катушкѣ, съ силою втягиваются внутрь ея. Здѣсь, на столикѣ, посреди котораго имѣется отверстіе, стоитъ вертикальная катушка, приготовленная изъ толстой мѣдной проволоки. Эта катушка поставлена такъ, что отверстіе въ столѣ приходится какъ разъ противъ отверстія катушки. Я пропускаю сильный токъ по катушкѣ и подношу къ ней снизу толстый тяжелый желѣзный цилиндръ. Вы замѣчаете по тому усилію, съ которымъ я удерживаю цилиндръ, какъ велико притяженіе цилиндра катушкою. Я освобождаю теперь цилиндръ. Онъ быстро втягивается внутрь катушки и остается висящимъ въ воздухѣ внутри ея. Я стараюсь вытолкнуть цилиндръ изъ катушки. Цилиндръ нѣсколько опускается, но затѣмъ, какъ только я оставляю его, онъ снова поднимается вверхъ, какъ будто онъ подвѣшенъ на прочной пружинѣ.

Эта катушка съ находящимся внутри ея желѣзнымъ цилиндромъ представляетъ собою *электромагнитъ*. Электромагниты вообще много сильнѣе стальныхъ магнитовъ. По дѣйствіямъ же они подобны послѣднимъ. Какъ уже было сообщено раньше, намагниченіе стали при помощи электрическаго тока было произведено впервые Араго въ 1820 г. Но только черезъ пять лѣтъ послѣ этого, въ 1825 г., былъ приготовленъ Стюрдженомъ [1]) первый электромагнитъ, т.-е. было открыто свойство мягкаго желѣза обращаться въ сильный магнитъ подъ дѣйствіемъ окружающаго это желѣзо въ видѣ спирали проводника съ токомъ. Желѣзный стержень перваго прямого электромагнита Стюрджена вѣсилъ 7 унцій (198,5 гр.). Этотъ электромагнитъ, при прохожденіи по его обмоткѣ тока отъ элемента, состоявшаго изъ мѣди, цинка и подкисленной воды, могъ поддерживать грузъ въ 9 фунтовъ, т.-е. грузъ, который по вѣсу около 20 разъ

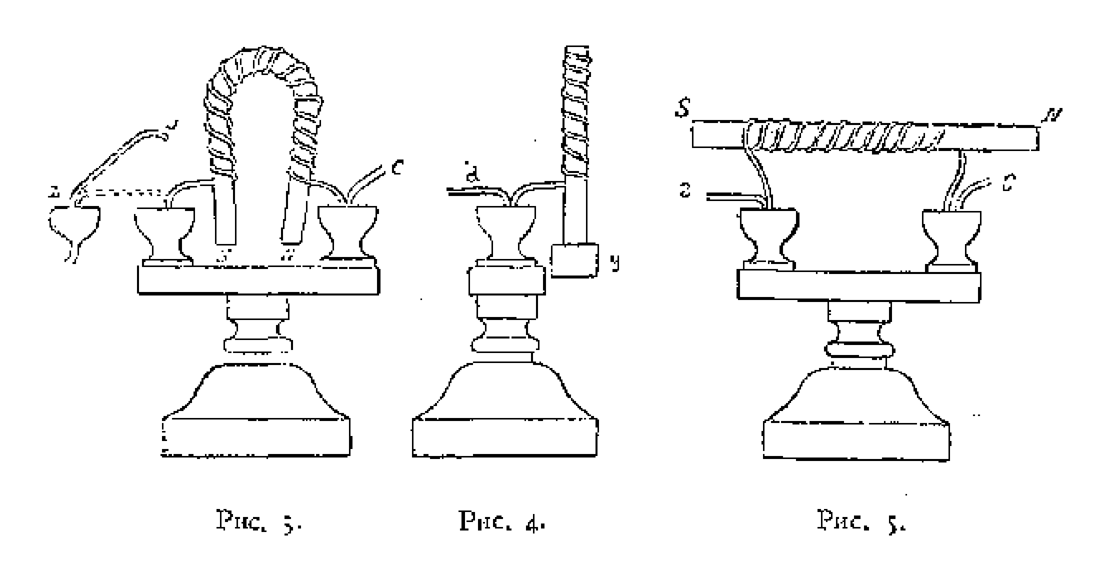


Рис. 3. Рис. 4. Рис. 5.

больше самого стержня электромагнита. Впослѣдствіи Джоуль тѣмъ же самымъ электромагнитомъ, но только при употребленіи болѣе сильнаго тока, поднималъ грузъ въ 50 фунтовъ. Рисунки 3, 4, 5 изображаютъ первые электромагниты Стюрджена. 1825 г.—это начало эры электромагнетизма, столь важнаго по своимъ приложеніямъ въ настоящее время.

---

[1]) Стюрдженъ родился въ Вашингтонѣ въ 1783 г., умеръ около Манчестера въ 1850 г.

Оставляя въ сторонѣ разсмотрѣніе многочисленныхъ работъ, относящихся къ теоріи и устройству электромагнитовъ, я упомяну только вкратцѣ объ изслѣдованіяхъ, произведенныхъ знаменитымъ англійскимъ физикомъ Джоулемъ [1]), однимъ изъ творцовъ термодинамики. Я потому касаюсь работъ Джоуля, хотя эти работы произведены еще въ тридцатыхъ годахъ, что одинъ изъ выводовъ, къ которымъ пришелъ Джоуль изъ своихъ опытовъ, представляетъ собою въ настоящее время основаніе для расчетовъ при проектированіи электромагнитовъ. Этотъ выводъ слѣдующій.

При приготовленіи электромагнита слѣдуетъ главнымъ образомъ обращать вниманіе на два обстоятельства: на длину желѣзнаго сердечника и на величину поперечнаго сѣченія его. Чѣмъ короче сердечникъ и чѣмъ больше его сѣченіе, тѣмъ болѣе сильный получается электромагнитъ.

Здѣсь виситъ одинъ изъ электромагнитовъ Джоуля (рис. 6). Сердечникъ этого электромагнита — толстостѣнный желѣзный цилиндръ, отъ котораго отпилена, параллельно оси, меньшая часть. На оставшейся бо̀льшей части цилиндра наложена обмотка изъ толстой проволоки, наложена такъ, что плоскости оборотовъ этой обмотки проходятъ чрезъ ось цилиндра. Отдѣленная меньшая часть цилиндра обращена въ якорь электромагнита. Подъемная сила этого электромагнита очень большая. Тока отъ одного аккумулятора и даже отъ одного элемента Гренэ вполнѣ достаточно, чтобы человѣкъ и даже два человѣка не были въ состояніи оторвать якорь отъ электромагнита. Даже по прекращеніи тока нельзя оторвать якорь. Чтобы отдѣлить его, приходится его сдвигать съ электромагнита и только такимъ путемъ, т. е. сдвиганіемъ, является возможность отнять якорь прочь. Мы скажемъ теперь: *сердечникъ этого электромагнита имѣетъ малое магнитное сопротивленіе, вслѣдствіе чего въ немъ возбуждается*

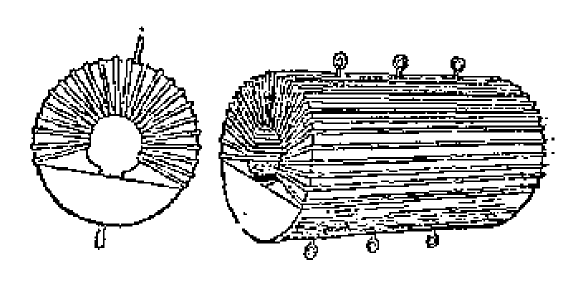


Рис. 6.

[1]) Джоуль родился въ Сольфердѣ въ 1818 г., умеръ вблизи Манчестера въ 1889 г.

сильный магнитный потокъ, вызывающій большую подъемную силу у электромагнита.

Джоуль построилъ и крошечный электромагнитъ, который онъ назвалъ элементарнымъ электромагнитомъ. Кусокъ желѣзной проволоки, длиною немногимъ больше 6 мм. (6,35 мм.) и діаметромъ около 1 мм., былъ согнутъ въ полукругъ и обмотанъ тремя оборотами мѣдной проволоки, 0,6 мм. въ діаметрѣ. Вѣсъ этого электромагнита былъ всего 33 мгр., а поддерживать онъ могъ 93,5 гр., т. е. грузъ, котораго вѣсъ былъ въ 2834 раза больше вѣса электромагнита.

На ряду съ этимъ миніатюрнымъ электромагнитомъ я не могу не сопоставить другого электромагнита, приготовленнаго въ Америкѣ, въ 1887 г., маіоромъ Кингомъ изъ двухъ пушекъ 15-ти дюймоваго калибра. Казенныя части этихъ пушекъ были соединены при помощи рельсовъ, якорь былъ приготовленъ также изъ нѣсколькихъ рельсовъ, связанныхъ вмѣстѣ. Для обмотки былъ употребленъ толстый кабель. Токъ получался отъ динамомашины, питавщей 20 дуговыхъ лампъ. Устроенный такимъ образомъ электромагнитъ поддерживалъ грузъ вѣсомъ до 10 тоннъ, т. е. до 610 пудовъ.

Я произведу одинъ опытъ съ имѣющимся здѣсь электромагнитомъ. Я пропускаю чрезъ этотъ электромагнитъ токъ, по силѣ около 20—25 амперовъ. Вы видите, я въ состояніи нанизать на нижній конецъ стержня электромагнита длинную цѣпь изъ желѣзныхъ цилиндриковъ (рис. 7). Но не одно только желѣзо притягивается электромагнитомъ. Вѣдь уже было упомянуто, что никкель и кобальтъ также точно чувствуютъ очень сильно магнитное дѣйствіе. Я прерываю токъ въ электромагнитѣ. Желѣзные цилиндрики отпадаютъ. Я снова пропускаю токъ и теперь нанизываю цѣпь изъ никкелевыхъ кубиковъ. Я получилъ цѣпь изъ никкелевыхъ кубиковъ почти такой же длины, какъ раньше изъ желѣзныхъ цилиндриковъ. Итакъ, мы видимъ, что никкель относится къ магниту совершенно подобно желѣзу.

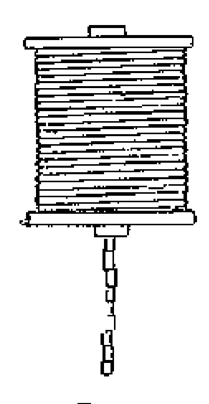


Рис. 7.

При разсмотрѣніи механическихъ дѣйствій между магнитами, сводятъ очень часто эти дѣйствія исключительно на дѣйствія

между полюсами магнитовъ. Говорятъ о распредѣленіи магнетизма на поверхности магнита, о томъ, что ближе къ концамъ магнита содержится больше и магнетизма, что въ серединѣ магнита совсѣмъ нѣтъ магнетизма. Все это одна лишь фикція. Въ самомъ дѣлѣ, мы уже знаемъ, что какъ бы мы ни раздѣляли магнитъ, на сколько бы частей ни разламывали его, мы получали бы отдѣльные куски все-таки въ видѣ цѣльныхъ магнитиковъ. Даже тѣ части магнита, которыя, когда онъ былъ не распиленъ, находились въ серединѣ его, оказались бы послѣ распиливанія магнита наиболѣе сильно намагниченными. Что вообще внѣшнія дѣйствія не всегда служатъ достаточнымъ критеріемъ магнитныхъ свойствъ тѣла, можетъ убѣдить насъ слѣдующій опытъ. Я держу въ рукахъ кольцо (рис. 8), приготовленное изъ стали. Это кольцо распилено на двѣ равныя части; концы обѣихъ частей тщательно отшлифованы и обѣ половины кольца сложены своими концами вмѣстѣ. Вокругъ кольца наложена обмотка изъ проволоки. Я пропускаю чрезъ эту обмотку токъ. Я говорю, что кольцо намагнитилось отъ тока, между тѣмъ кольцо, повидимому, не обнаруживаетъ даже признаковъ магнетизма. Въ самомъ дѣлѣ, поднося кольцо къ одному, а затѣмъ къ другому полюсу магнитной стрѣлки, я вижу, что кольцо притягиваетъ одинаково оба полюса стрѣлки, т. е. дѣйствуетъ на стрѣлку совершенно такъ же, какъ дѣйствуетъ на нее ненамагниченная сталь. Теперь я раздѣляю кольцо на двѣ половины. Подношу къ магнитной стрѣлкѣ сначала конецъ одной половины, затѣмъ конецъ другой половины. Мы ясно видимъ, что та и другая половины стального кольца довольно сильно намагничены и что два конца, которые прикасались другъ къ другу, обладаютъ противоположными магнетизмами. Итакъ, два намагниченныя полукольца, сложенныя вмѣстѣ, т. е. образующія собою одно замкнутое кольцо, какъ бы теряютъ свои магнитныя свойства. Впослѣдствіи мы узнаемъ, что *въ данномъ случаѣ весь магнитный потокъ сосредоточивается исключительно внутри кольца, что ни одна магнитная*

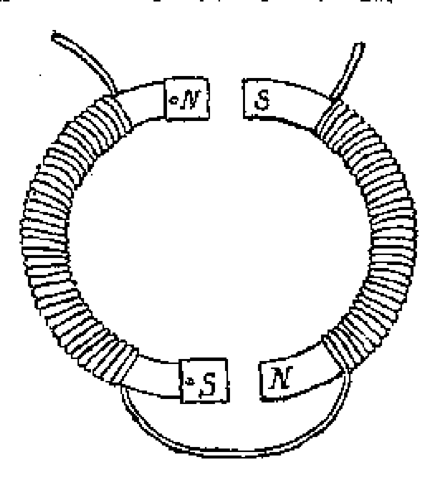


Рис. 8.

силовая линія не выходитъ наружу его, вслѣдствіе чего и не возбуждается магнитнаго поля внѣ этого кольца.

Такое кольцо, въ дѣйствительности намагниченное, но внѣшними дѣйствіями нисколько не обнаруживающее своего магнетизма, является претерпѣвшимъ существенныя измѣненія въ своемъ внутреннемъ строеніи отъ намагничивающаго дѣйствія тока, которому оно было подвергнуто. Я вернусь еще къ этому вопросу. Теперь скажу, что, если бы мы подвергнули это кольцо весьма точнымъ измѣреніямъ, то мы замѣтили бы, что послѣ прохожденія тока по обмоткѣ кольца объемъ кольца оказался бы больше, чѣмъ онъ былъ до пропусканія тока. Правда, это измѣненіе объема было бы очень малымъ, но, тѣмъ не менѣе, оно не только могло бы быть замѣчено, а и измѣрено.

Измѣненіе размѣровъ желѣзныхъ и стальныхъ стержней и проволокъ при намагниченіи — фактъ давно извѣстный. Еще въ 1847 г. Джоуль наблюдалъ удлиненіе желѣзнаго стержня вслѣдствіе намагниченія и даже вывелъ изъ своихъ наблюденій законъ, которому подчиняется разсматриваемое явленіе. Послѣ работы Джоуля было произведено много изслѣдованій по этому вопросу и въ особенности много въ послѣднее время. Изслѣдованія показали, что всѣ сильно магнитныя тѣла, и желѣзо, и сталь, и никкель, и кобальтъ, претерпѣваютъ измѣненія въ своихъ размѣрахъ отъ дѣйствія намагниченія. При этомъ одни тѣла удлиняются, другія укорачиваются, у однихъ тѣлъ объемъ уменьшается, у другихъ онъ увеличивается — вообще это явленіе представляется весьма сложнымъ и зависящимъ отъ многихъ обстоятельствъ. Оказывается также, что и упругія свойства тѣла подвергаются измѣненію отъ намагниченія этого тѣла. Такъ, напр., закрученныя проволоки раскручиваются при намагниченіи.

Упомянутые факты и были главнымъ образомъ причиною появленія новой теоріи намагниченія тѣлъ, объясняющей до извѣстной степени эти факты. Такая теорія была предложена В. Веберомъ[1]) и получила на долгое время право гражданства въ наукѣ. По теоріи Вебера каждая частица магнитнаго тѣла представляетъ собою готовый постоянный магнитикъ, т. е. обладаетъ противоположною

[1]) Веберъ родился въ Виттенбергѣ въ 1804 г., умеръ въ Гёттингенѣ въ 1891 г.

магнитною полярностью на двухъ противоположныхъ частяхъ своей поверхности. Эти магнитныя свойства каждой частички суть, такъ сказать, прирожденныя свойства вещества тѣла. Пока тѣло не подвержено намагничивающей силѣ — дѣйствію какихъ-либо магнитовъ, проводниковъ съ токами или электромагнитовъ, частицы своими магнитными осями расположены въ тѣлѣ по всевозможнымъ направленіямъ. Вслѣдствіе такого хаотическаго распредѣленія частицъ тѣла послѣднее не проявляетъ никакихъ магнитныхъ свойствъ. Дѣйствіе одного элементарнаго магнитика компенсируется противоположнымъ дѣйствіемъ другого сосѣдняго магнитика. Подъ вліяніемъ намагничивающей силы происходитъ поворотъ частицъ внутри тѣла, всѣ частицы-магнитики располагаются такъ, что одноименные концы ихъ магнитныхъ осей обращаются въ одну и ту же сторону. Чѣмъ больше къ параллельности приближаются магнитныя оси всѣхъ частичекъ тѣла, тѣмъ сильнѣе намагниченнымъ является и само тѣло. Когда всѣ частицы расположатся своими осями параллельно другъ другу и параллельно дѣйствующей на нихъ магнитной силѣ, тѣло достигаетъ магнитнаго насыщенія, т. е. оно не въ состояніи еще сильнѣе намагнититься. Эта теорія Вебера напоминаетъ собою теорію Ампера. Молекулярные магнитики Вебера — это элементарные замкнутые электрическіе токи въ теоріи Ампера. Теорія Вебера, нѣсколько измѣненная Максвеллемъ [1]) и затѣмъ Юингомъ [2]), представляетъ собою весьма удобную *описательную* теорію намагниченія тѣлъ, но эта теорія нисколько не выясняетъ сущности магнитныхъ явленій, равнымъ образомъ она не указываетъ и самаго процесса передачи магнитныхъ дѣйствій на разстояніе. Въ основѣ этой теоріи лежитъ по прежнему допущеніе «*дѣйствія на разстояніе*», т. е. принципъ Ньютона.

Теорія молекулярныхъ магнитовъ, предложенная Веберомъ, можетъ быть, однако, весьма существенно измѣнена. Представленіе о молекулярныхъ магнитахъ можетъ быть обобщено на всѣ тѣла природы, а въ такомъ случаѣ является возможнымъ отказаться и отъ допущенія магнитнаго дѣйствія на разстояніе. Въ самомъ дѣлѣ, извѣстное распредѣленіе молекулярныхъ маг-

---

[1]) Максвелль родился въ Эдинбургѣ въ 1831 г., умеръ въ Кембриджѣ въ 1879 г.

[2]) Юингъ — современный англійскій физикъ.

нитовъ въ желѣзѣ или стали при намагниченіи этихъ тѣлъ произведетъ соотвѣтствующее перераспредѣленіе частичекъ въ окружающей магнитъ средѣ, въ слоѣ, непосредственно прилегающемъ къ магниту. Этотъ слой повліяетъ на сосѣдній слой, тотъ на слѣдующій и т. д. Однимъ словомъ, произойдетъ во всемъ пространствѣ, окружающемъ магнитъ, измѣненіе въ расположеніи частичекъ, при чемъ такое перераспредѣленіе частичекъ будетъ вызвано не моментально во всемъ пространствѣ, а будетъ передаваться отъ слоя къ слою съ нѣкоторою скоростью. Наблюдаемое нами магнитное дѣйствіе въ какомъ-либо тѣлѣ, помѣщенномъ въ этомъ пространствѣ, будетъ результатомъ дѣйствія на это тѣло того слоя среды, который непосредственно прилегаетъ къ этому тѣлу, а не представитъ собою, какъ это принимается въ теоріяхъ, основанныхъ на принципѣ «actio in distans» непосредственнаго вліянія отдаленнаго магнита. Такимъ образомъ можетъ быть устранено допущеніе передачи дѣйствія на разстояніе, оно замѣняется допущеніемъ дѣйствія двухъ непосредственно соприкасающихся другъ съ другомъ слоевъ.

Въ приведенномъ обобщеніи идеи молекулярныхъ магнитовъ нужно еще расширить предѣлы. Необходимо эту идею распространить и на пустоту. Вѣдь чрезъ пустоту вполнѣ свободно передаются магнитныя дѣйствія. Итакъ, то, что̀ приписывается обыкновенной матеріи, приходится, согласно развиваемой теоріи, отнести и на эфиръ, наполняющій собою пустоту. Но здѣсь встрѣчается большое затрудненіе. Какъ должны мы представлять себѣ молекулярный магнитикъ въ эфирѣ? Что это такое? Не менѣе, если даже не болѣе, затруднительнымъ является и другой вопросъ. Какимъ путемъ возбуждается распредѣленіе молекулярныхъ магнитиковъ въ тѣлѣ, когда это тѣло подвергается дѣйствію намагничивающаго тока? Другими словами, какая связь между тѣмъ, что̀ мы называемъ электрическимъ токомъ и тѣмъ, что̀ представляемъ себѣ въ видѣ молекулярныхъ магнитовъ? — Я постараюсь нѣсколько позже выяснить, что эти затрудненія могутъ быть до извѣстной степени устранены, если мы измѣнимъ основное представленіе о причинѣ магнитныхъ явленій. Не молекулярные магниты, существующіе въ тѣлѣ съ момента образованія въ природѣ вещества этого тѣла, а особыя движенія, возбуждающіяся въ эфирѣ, заполняющемъ тѣло, подъ вліяніемъ

электрическаго тока, который проходитъ по проводнику и который представляетъ собою также движенія эфира — вотъ что можетъ быть принято за причину наблюдаемыхъ нами магнитныхъ явленій.

Я вернусь еще къ этому вопросу. Теперь замѣчу только, что мы можемъ имѣть представленіе о магнитныхъ дѣйствіяхъ, какъ передающихся при посредствѣ среды, которая отдѣляетъ собою тѣла, только *кажущимся образомъ* непосредственно дѣйствующія другъ на друга, и передающихся этою средою не моментально, а съ нѣкоторою конечною скоростью. При такомъ взглядѣ на природу магнитныхъ явленій необходимо и самую среду представлять себѣ подвергающеюся измѣненію въ своемъ внутреннемъ строеніи. Частицы этой среды, какъ и частицы, находящіяся внутри намагниченнаго тѣла, должны распредѣляться по нѣкоторымъ опредѣленнымъ направленіямъ. Такое измѣненіе въ средѣ, окружающей собою магниты или проводники съ токами, такую такъ называемую «*поляризацію*» среды и воображалъ Михаилъ Фарадэй.

Ученіе Фарадэя, математически обработанное впослѣдствіи Максвеллемъ, свободно отъ допущенія дѣйствія на разстояніе. Въ основѣ этого ученія лежитъ идея о передачѣ магнитныхъ и электрическихъ дѣйствій при помощи поляризаціи среды.

Эта счастливая идея и дала возможность Фарадэю произвести такъ много важныхъ открытій, слѣдствіями которыхъ мы пользуемся въ настоящее время. Ученіе Фарадэя о магнитныхъ силовыхъ линіяхъ, долгое время не признававшееся въ наукѣ и почти совсѣмъ осмѣянное, теперь составляетъ основаніе теоріи электричества и электромагнетизма. Даже болѣе, для каждаго электротехника силовыя линіи на столько же необходимы, на сколько необходимо для него представленіе объ электрическомъ токѣ. Электротехникъ *считаетъ* силовыя линіи между полюсами динамомашины, какъ мѣряетъ онъ число амперъ тока въ проводникѣ. Эти силовыя линіи для него являются чѣмъ-то матеріальнымъ, осязаемымъ. Но что же такое должно подразумѣвать подъ словомъ «*силовая магнитная линія*»?

Сначала я дамъ только механическое опредѣленіе этого понятія. Мы знаемъ, что магнитъ и проводникъ съ токомъ дѣйствуютъ на находящійся въ нѣкоторомъ разстояніи отъ нихъ

(въ воздухѣ или въ пустотѣ) полюсъ магнитной стрѣлки. Постараемся теоретически, пользуясь законами Кулона или Ампера, или опытнымъ образомъ опредѣлить направленіе магнитной силы, дѣйствующей на сѣверный полюсъ, для различныхъ положеній этого полюса и по возможности въ большемъ числѣ точекъ пространства вокругъ магнита или тока. Если затѣмъ мы проведемъ въ пространствѣ кривыя линіи и проведемъ ихъ такъ, что наблюденныя направленія магнитныхъ силъ будутъ касательными къ точкамъ этихъ кривыхъ линій, то такія кривыя линіи и представятъ собою магнитныя силовыя линіи. Понятно, что, если бы можно было имѣть въ отдѣльности *одинъ* сѣверный полюсъ, онъ отъ дѣйствія магнита или тока пришелъ бы въ движеніе по направленію такой силовой линіи, проходящей чрезъ первоначальное положеніе полюса. Итакъ, *силовыя магнитныя линіи* могутъ быть опредѣлены, какъ *направленія магнитныхъ силъ въ пространствѣ, какія испытывалъ бы сѣверный магнитный полюсъ, передвигаемый вдоль этихъ кривыхъ линій.*

Но мы не можемъ имѣть въ отдѣльности одного полюса. По свойству магнитныхъ явленій, дѣйствія, испытываемыя двумя противоположными полюсами, всегда діаметрально противоположны. Отсюда ясно, что очень маленькій магнитъ подъ вліяніемъ другого магнита или тока будетъ всегда устанавливаться по направленію касательной къ силовой магнитной линіи, проходящей чрезъ середину этого магнита. Поэтому то, перемѣщая въ пространствѣ, въ которомъ имѣются магниты или проводники съ токомъ, т. е. гдѣ магнитный полюсъ испытываетъ магнитную силу (назовемъ для краткости такое пространство *магнитнымъ полемъ*), подвѣшенный за середину на нити очень маленькій магнитъ и замѣчая направленія, какія онъ будетъ принимать въ различныхъ своихъ положеніяхъ, мы будемъ въ состояніи вычертить для горизонтальныхъ сѣченій этого поля силовыя магнитныя линіи. Но это достигается еще легче при посредствѣ мелкихъ желѣзныхъ опилокъ. Посыпая въ магнитномъ полѣ на какую-либо горизонтальную плоскость, листъ бумаги или стекла, желѣзныя опилки и слегка ударяя по листу для облегченія расположенія опилокъ, мы получимъ опилки расположенными правильно по направленіямъ силовыхъ линій. Въ этомъ случаѣ каждый кусочекъ желѣза обращается въ магнитикъ и располагается своею магнитною

осью вдоль силовой линіи. Изъ отдѣльныхъ кусочковъ составляется цѣпь, которая и совпадаетъ по направленію съ силовой линіей. Итакъ, при помощи желѣзныхъ опилокъ весьма просто иллюстрируется характеръ магнитнаго поля въ горизонтальныхъ его сѣченіяхъ. Если бы можно было заставить такія опилки свободно висѣть въ пространствѣ, какъ виситъ въ воздухѣ тонкая пыль, было бы возможно опредѣлить направленіе силовыхъ линій и вообще въ пространствѣ.

Я демонстрирую теперь нѣсколько подобныхъ *«магнитныхъ спектровъ»*, полученныхъ въ различныхъ магнитныхъ поляхъ. Рис. 9 представляетъ собою *«магнитный спектръ»*, т. е. направ-

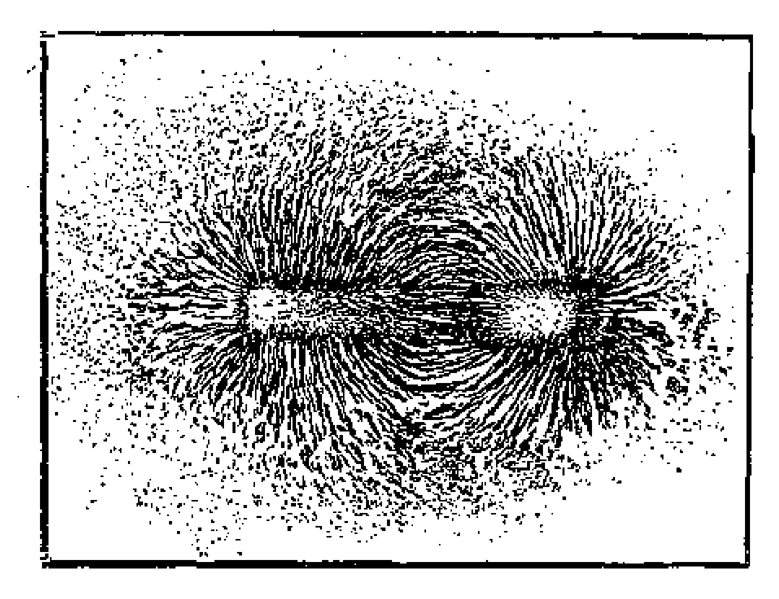


Рис. 9.

ленія силовыхъ линій въ горизонтальной плоскости непосредственно надъ прямымъ магнитомъ. Желѣзныя опилки были посыпаны на тонкое стекло, подъ которымъ былъ подложенъ магнитъ. Эти опилки закрѣплены на стеклѣ пульверизаціей хлороформнаго лака. Характеръ распредѣленія силовыхъ линій или, лучше, силовыхъ нитей—ясенъ. Эти нити уподобляются струямъ жидкости, которыя какъ бы истекаютъ изъ одной половины магнита и втекаютъ въ другую, *отталкивая другъ друга* и въ тоже самое время *стягиваясь по своей длинѣ*. Наибольшее число нитей замѣчается на концахъ магнита. Рис. 10 представляетъ распредѣленіе силовыхъ линій въ горизонтальной плоскости не-

посредственно надъ промежуткомъ между противоположными полюсами двухъ обращенныхъ другъ къ другу своими концами

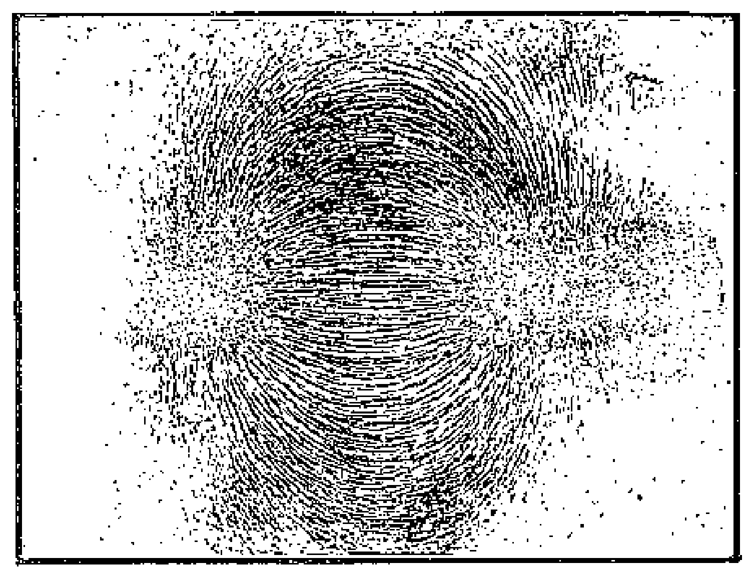


Рис. 10.

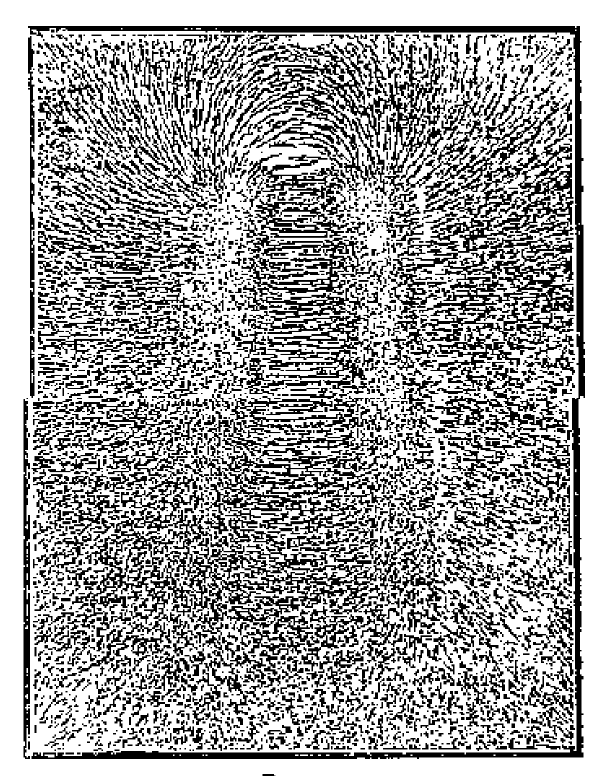


Рис. 11.

магнитовъ. Здѣсь силовыя линіи также какъ бы истекаютъ изъ одного полюса и, *отталкивая* другъ друга, втекаютъ въ другой

полюсъ. Рис. 11 даетъ спектръ отъ подковообразнаго магнита. Слѣдующій рис. 12 представляетъ распредѣленіе силовыхъ ли-

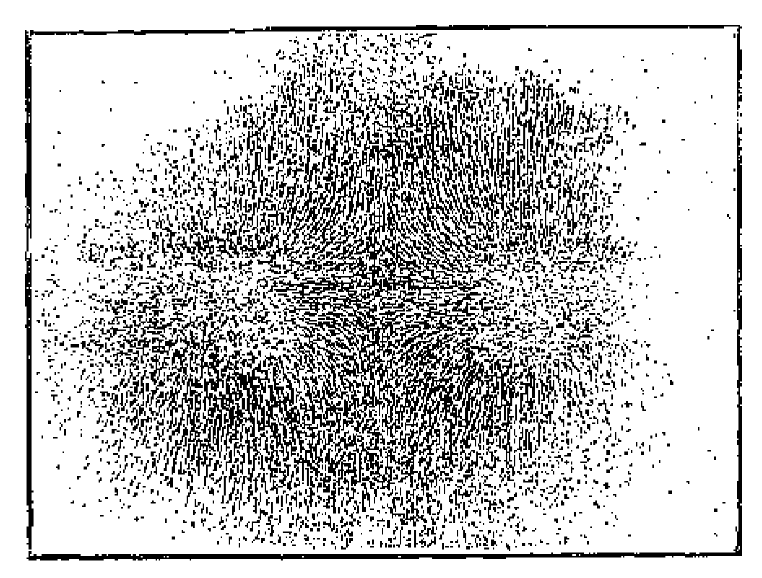


Рис. 12.

ній надъ двумя обращенными другъ къ другу одноименными полюсами двухъ магнитовъ. Въ этомъ случаѣ два потока устрем-

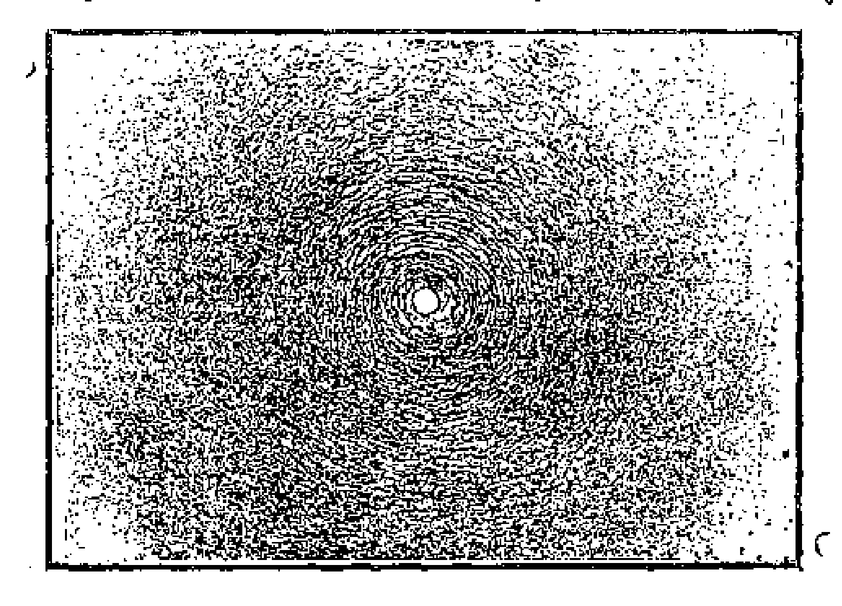


Рис. 13.

ляются изъ двухъ полюсовъ и затѣмъ какъ будто сливаются вмѣстѣ въ два потока, направляющіеся въ обѣ стороны по на-

правленіямъ, перпендикулярнымъ къ линіи соединенія полюсовъ. Итакъ, силовыя линіи, имѣющія противоположныя направленія, какъ будто притягиваютъ другъ друга. Рис. 13 даетъ магнитный спектръ въ плоскости, перпендикулярной къ длинному прямолинейному проводнику съ токомъ. Черезъ отверстіе въ серединѣ стеклянной горизонтальной пластинки была пропущена толстая мѣдная прямая вертикальная проволока съ сильнымъ токомъ. Опилки расположились въ видѣ концентрическихъ круговъ, имѣющихъ общій центръ въ серединѣ проволоки. Наконецъ, рис. 14 показываетъ силовыя линіи въ горизонтальной

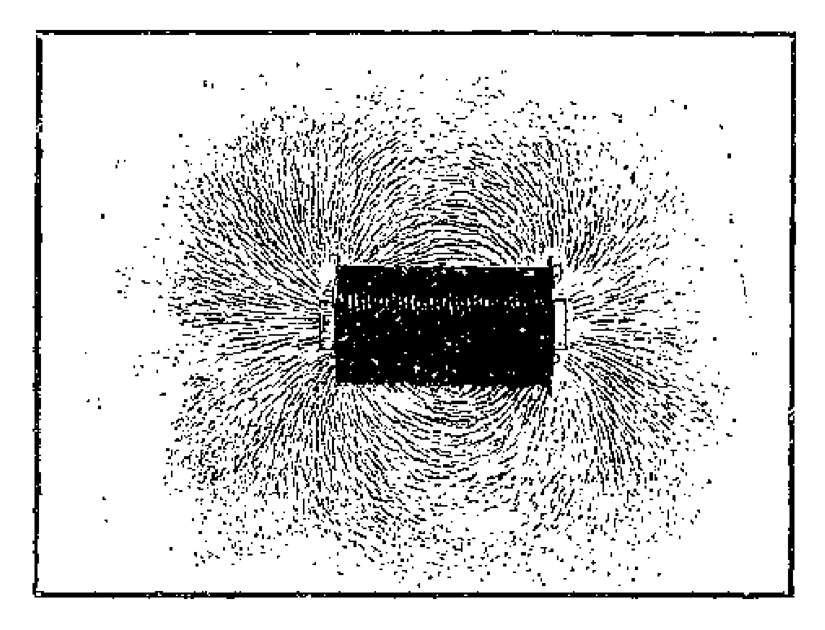


Рис. 14.

плоскости, проходящей чрезъ ось горизонтальной катушки изъ проволоки, по которой проходитъ токъ. Въ этомъ случаѣ мы видимъ, что характеръ поля вполнѣ тождественъ съ тѣмъ, какой соотвѣтствуетъ магнитному полю отъ обыкновеннаго прямого магнита. Вспомнимъ, еще Амперъ показалъ, что это и должно быть такъ. Магнитъ въ его внѣшнихъ дѣйствіяхъ можетъ быть замѣненъ соотвѣтствующей катушкой съ токомъ и обратно.

Мы познакомились съ характеромъ магнитныхъ полей въ нѣсколькихъ случаяхъ. Мы видѣли распредѣленіе силовыхъ магнитныхъ линій въ горизонтальныхъ сѣченіяхъ этихъ полей. Но

до сихъ поръ мы имѣли дѣло съ опредѣленіемъ силовыхъ линій при посредствѣ другихъ магнитиковъ. Вѣдь каждый кусокъ желѣза въ магнитномъ полѣ обращается въ магнитъ. Что же представляетъ собою пространство вокругъ магнита или проводника съ токомъ, когда въ этомъ пространствѣ нѣтъ магнитовъ, могущихъ испытывать на себѣ магнитныя силы? Однимъ словомъ, какой характеръ являетъ магнитное поле при отсутствіи въ немъ магнитныхъ полюсовъ, которые чувствуютъ на себѣ дѣйствіе этого поля? Возможно ли и въ этомъ послѣднемъ случаѣ говорить о силовыхъ линіяхъ? Отвѣту на этотъ вопросъ и будетъ посвящена слѣдующая лекція.

Лекція 3-я.

Въ концѣ прошлой лекціи былъ поставленъ вопросъ, что представляетъ изъ себя магнитное поле, имѣется ли въ немъ что-либо, напоминающее силовыя магнитныя линіи, когда въ него не внесены полюсы магнитовъ, испытывающіе непосредственно магнитныя силы и тѣмъ дающіе возможность опредѣлить какъ направленіе, такъ и величину послѣднихъ. Чтобы отвѣтить на этотъ вопросъ, попробуемъ изслѣдовать магнитное поле иначе, *безъ посредства магнитныхъ стрѣлокъ или желѣзныхъ опилокъ*. Само собой разумѣется, изслѣдованіе поля значительно облегчится, если это поле будетъ достаточно сильно. Въ послѣднемъ случаѣ можно напередъ предвидѣть, что вызываемыя въ полѣ явленія будутъ замѣтнѣе, а слѣдовательно скорѣе будутъ въ состояніи обратить на себя наше вниманіе.

Сильное магнитное поле получается между близко сведенными другъ къ другу полюсами большаго электромагнита, когда по обмоткѣ его пропущенъ сильный токъ. При приближеніи къ полюсамъ такого электромагнита какого-либо желѣзнаго предмета чувствуется уже на довольно большомъ разстояніи притяженіе желѣза; а если между полюсами повѣсить горизонтально на шелковинкѣ желѣзный стерженекъ, прикрѣпивъ его къ шелковинкѣ за середину, то при замыканіи тока стерженекъ тотчасъ же повертывается и прочно устанавливается по направленію линіи, соединяющей полюсы, по направленію, какъ мы назовемъ, *осевой линіи* электромагнита. Чтобы еще болѣе усилить магнитное поле, привинтимъ къ желѣзнымъ параллелепипедамъ, наложеннымъ на верхнія концы стержней электромагнита, желѣзные наконечники, имѣющіе форму закругленныхъ на концахъ конусовъ. Между этими конусами, обращенными другъ къ другу и своими осями расположенными по осевой линіи электромагнита, можетъ образоваться очень сильное поле. Но поле, возни-

кающее между такими наконечниками, *неоднородно*. Магнитныя дѣйствія въ центрѣ этого поля болѣе интензивны, чѣмъ по

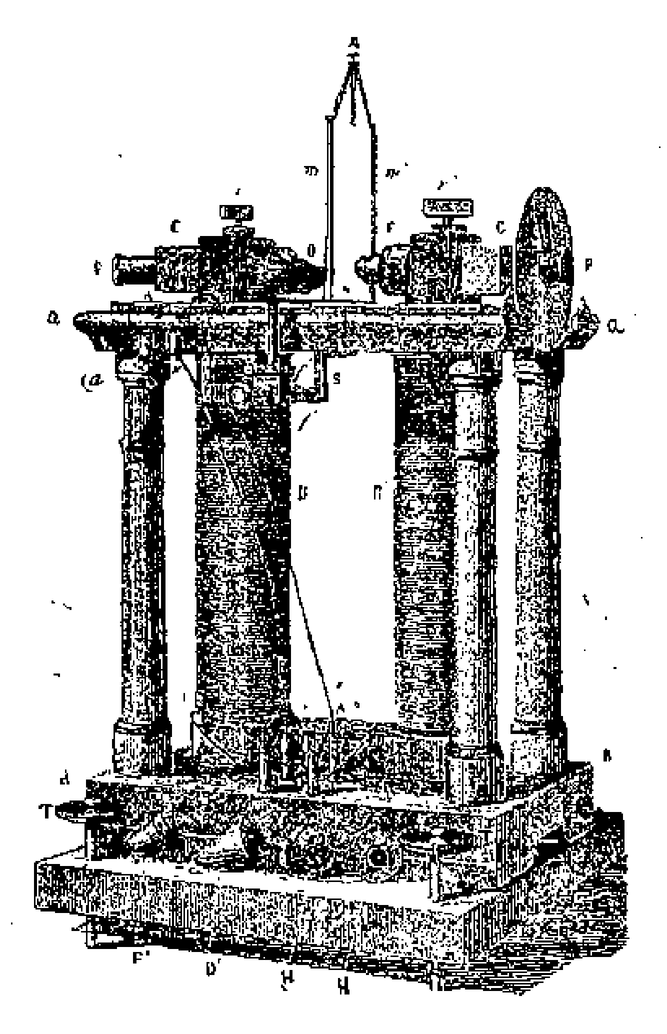


Рис. 15.

сторонамъ. (Рис. 15 изображаетъ большой электромагнитъ съ различными наконечниками).

При посредствѣ желѣзныхъ опилокъ легко получить направленіе силовыхъ линій въ разсматриваемомъ нами магнитномъ полѣ. Очевидно, что по характеру это поле подобно тому, какое вообще получается между обращенными другъ къ другу противоположными полюсами. Рис. 16 иллюстрируетъ это поле.

Подвѣсимъ на шелковинкѣ небольшой стерженекъ изъ какого угодно вещества, подвѣсимъ его горизонтально и симметрично

относительно обоихъ конусовъ. Мы увидимъ, что такой стерженекъ не станетъ относиться пассивно къ возбужденію магнитнаго поля. Напротивъ, вслѣдъ за замыканіемъ намагничивающаго тока стерженекъ повернется и установится въ совершенно опредѣленномъ направленіи. Чтобы яснѣе показать сказанное, повѣсимъ на шелковинкѣ продолговатый кусокъ такъ называемой красной, кровяной, желѣзной соли. Какъ только замкнуть токъ въ электромагнитѣ, этотъ кусокъ повертывается и устанавливается такъ же, какъ и желѣзный цилиндръ, т. е. своею длиною по осевому направленію. Выведемъ стерженекъ изъ этого положенія; онъ

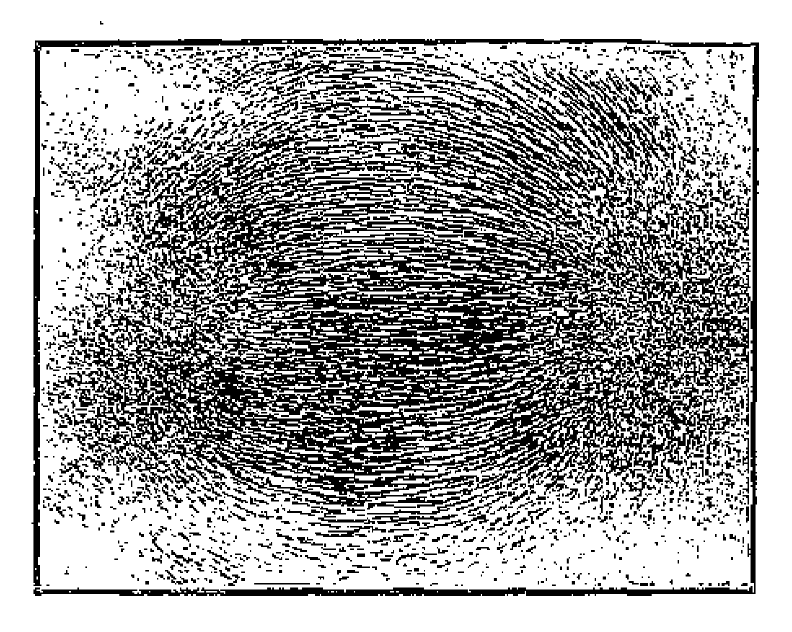


Рис. 16.

снова послѣ двухъ-трехъ качаній возвращается опять въ это положеніе. Такъ, какъ кровяная соль, будутъ устанавливаться въ образующемся *неоднородномъ* магнитномъ полѣ и многія другія тѣла, какъ твердыя, такъ и жидкія. Я подвѣшиваю запаянную, стеклянную маленькую трубочку, наполненную растворомъ хлорнаго желѣза. При намагниченіи электромагнита, вы видите, эта трубочка энергично устанавливается также по осевому направленію. Не говорю про сталь, никкель и кобальтъ. Понятно, что всѣ эти три вещества, по своимъ магнитнымъ свойствамъ подобныя желѣзу, должны и въ данномъ случаѣ относиться къ магнитному полю, какъ послѣднее. Но совершенно также относятся

къ магнитному полю и окислы желѣза, его различныя соли (за исключеніемъ желтой желѣзной соли), окислы и соли никкеля и кобальта, соли марганца, церія, дидима, хрома, какъ и сами эти металлы, мѣдный купоросъ и многія другія тѣла. Всѣ эти тѣла, подвѣшенныя между полюсами электромагнита, когда между этими полюсами возбуждается *неоднородное* магнитное поле, устанавливаются своею длиною по направленію, какое имѣютъ силовыя линіи въ полѣ. Но несравненно большее число тѣлъ устанавливается въ такомъ полѣ совсѣмъ иначе. Возьмемъ, какъ особенно характерное въ этомъ отношеніи вещество, металлъ висмутъ. Я подвѣшиваю на шелковинкѣ между конусами электромагнита висмутовый цилиндрикъ. При замыканіи тока цилиндрикъ рѣзко отклоняется отъ осевого направленія и помѣщается своею длиною по направленію, перпендикулярному къ осевой линіи. Назовемъ эту линію *экваторіальною*. Какъ располагается въ магнитномъ полѣ подвѣшенный висмутовый цилиндрикъ, такъ же расположатся въ немъ, т. е. по направленію экваторіальному, слѣдовательно — поперекъ силовыхъ линій, цилиндрики или вообще стерженьки весьма многихъ тѣлъ, можно сказать — большинства тѣлъ. Сюрьма, цинкъ, свинецъ, ртуть, серебро, золото, чистая платина, многіе другіе металлы, уголь, сѣра, воскъ, стекло, дерево, животныя ткани, волоса, кости, вода, масла и т. д. — все это относится къ возбужденному неоднородному магнитному полю, какъ висмутъ. Газообразныя тѣла также чувствуютъ магнитное поле. Если между полюсами электромагнита помѣстить нѣсколько рядовъ открытыхъ вертикальныхъ трубокъ и пустить газъ снизу такъ, чтобы онъ могъ проходить по всѣмъ трубкамъ, то одинъ газъ направится по преимуществу чрезъ трубки, расположенныя въ плоскости, совпадающей съ средней осевой линіей, другой газъ пойдетъ, напротивъ, главнымъ образомъ по трубкамъ, находящимся въ плоскости экваторіальной. Кислородъ ясно покажетъ первое, водородъ второе. Кислородъ особенно сильно чувствуетъ дѣйствіе магнита. Если наполнить кислородомъ мыльный пузырь и подвести этотъ пузырь къ оконечности сильнаго электромагнита, пузырь притягивается къ электромагниту и пристаетъ къ нему, какъ и обыкновенное желѣзо. Но особенно сильно магнитнымъ является кислородъ, когда онъ обращенъ въ жидкость. Опытъ съ ожижженнымъ кислородомъ на столько интересенъ, что я

не могу не произвести его. Въ этой Дюаровской колбѣ находится жидкій кислородъ съ примѣсью жидкаго азота. Эта смѣсь получена чрезъ ожижженіе обыкновеннаго воздуха при помощи прибора Линде. *Я не пропускаю* тока чрезъ обмотку электромагнита и лью жидкій воздухъ, вѣрнѣе — жидкій кислородъ съ примѣсью жидкаго азота, между наконечниками электромагнита. Вы видите, струя жидкости свободно протекаетъ между наконечниками. Я продолжаю лить эту жидкость, но *замыкаю* токъ въ электромагнитѣ. Посмотрите, *жидкость не льется ниже наконечниковъ электромагнита. Она притягивается этими наконечниками и образуетъ собою мостикъ, соединяющій концы ихъ.* Я прекращаю лить жидкій кислородъ. Жидкій кислородъ присталъ къ наконечникамъ электромагнита, образовавъ собою, какъ я сказалъ уже, мостикъ. Онъ кипитъ, но не сливается прочь. Теперь я размыкаю токъ. Жидкость моментально отрывается отъ полюсовъ электромагнита. Этотъ опытъ весьма поучителенъ. Онъ ясно указываетъ намъ, что жидкій кислородъ сильно магнитенъ.

Всѣ тѣла, встрѣчающіяся въ природѣ, испытываютъ вліяніе магнитнаго поля. Открытіе такого важнаго свойства тѣлъ принадлежитъ знаменитому Фарадэю и сдѣлано имъ въ 1845 году Тѣла въ неоднородномъ магнитномъ полѣ, устанавливающіяся такъ, какъ устанавливается желѣзо, Фарадэй назвалъ *парамагнитными*, а устанавливающіяся такъ, какъ устанавливается висмутъ — *діамагнитными.* Если поднести парамагнитное тѣло близко къ одному изъ полюсовъ электромагнита, оно притягивается этимъ полюсомъ, напротивъ, если поднести діамагнитное тѣло, то это тѣло отталкивается отъ полюса. Висмутъ особенно ясно указываетъ діамагнитныя свойства. Желѣзо и висмутъ являются наиболѣе характерными представителями двухъ категорій тѣлъ, парамагнитныхъ и діамагнитныхъ.

Еще въ недавнее время давалось весьма простое объясненіе явленіямъ парамагнетизма и діамагнетизма. Полагали, что парамагнитныя тѣла намагничиваются отъ дѣйствія полюсовъ электромагнита такъ же, только въ болѣе слабой степени, какъ и желѣзо, отъ чего и отношеніе ихъ къ магниту получается такое же, какъ и у желѣза. Представляли себѣ діамагнитныя тѣла намагничивающимися совершенно обратно, т. е. считали, что на концѣ діамагнитнаго стержня, ближайшемъ къ какому-либо полюсу

магнита, возбуждается магнетизмъ, одноименный съ магнетизмомъ этого полюса, — а отсюда и выводили, что дѣйствіе полюсовъ магнита на діамагнитное тѣло должно быть не притягательное, а отталкивательное.

Такое объясненіе, однако, является не всегда достаточнымъ и возможнымъ. Мы видѣли, что трубочка съ хлорнымъ желѣзомъ ясно обнаруживала свойства парамагнитнаго тѣла. Я беру опять эту трубочку, подвѣшиваю ее на шелковинкѣ между полюсами электромагнита, но помѣщаю ее не въ воздухѣ, какъ прежде, а погружаю въ стеклянный стаканчикъ, который теперь помѣщенъ между конусами электромагнита и который наполненъ растворомъ также хлорнаго желѣза, но только болѣе концентрированнымъ, чѣмъ растворъ въ самой трубочкѣ. При замыканіи тока, вы видите, трубочка повертывается, какъ висмутъ, т. е. находящійся въ ней растворъ хлорнаго желѣза является теперь діамагнитнымъ. Этотъ опытъ тоже Фарадэя. Такимъ образомъ одно и то же вещество является и парамагнитнымъ и діамагнитнымъ, смотря по тому, какая среда окружаетъ его въ магнитномъ полѣ. Беккерель[1]) много занимался подобными явленіями и изъ своихъ опытовъ вывелъ законъ, подобный закону Архимеда для вѣса тѣлъ. *Всякое тѣло, помѣщенное въ какую-либо жидкость или газъ, испытываетъ отъ магнита силу, равную разности тѣхъ силъ, съ какими въ отдѣльности дѣйствуетъ магнитъ на тѣло, когда оно находится въ абсолютной пустотѣ, и на объемъ жидкости или газа, вытѣсняемый испытуемымъ тѣломъ.* Таковъ законъ Беккереля. Если вѣренъ этотъ законъ, то мы можемъ дать иное объясненіе діамагнетизму тѣлъ, чѣмъ давали раньше. Но при этомъ мы должны сдѣлать еще одно предположеніе. Допустимъ, что та среда, которая наполняетъ собою обыкновенную пустоту, т. е. такъ называемый эфиръ, сама въ свою очередь, парамагнитна, иначе, что эта среда подчиняется дѣйствію магнита. Тогда, согласно закону Беккереля, всякое тѣло, которое намагничивается такъ же, какъ и любое парамагнитное тѣло, но которое только намагничивается слабѣе воздуха или пустоты, будетъ, находясь въ воздухѣ или въ пустотѣ, казаться діамагнитнымъ. Итакъ, діамагнитныя тѣла могутъ намагничиваться совершенно такъ же,

[1]) Беккерель (Антоній Цезарь) родился въ 1788 г., умеръ въ 1878 г.

какъ и парамагнитныя тѣла, только магнитныя свойства этихъ діамагнитныхъ тѣлъ должны быть менѣе интензивны, чѣмъ магнитныя свойства у воздуха и у эфира. Согласно закону Беккереля слѣдуетъ также, что тѣло, которое, находясь въ воздухѣ, является діамагнитнымъ, можетъ оказаться парамагнитнымъ въ другой средѣ, чѣмъ воздухъ. Для этого достаточно только, чтобы эта новая среда была бы болѣе діамагнитна, чѣмъ само тѣло. Опытъ подтверждаетъ такое заключеніе. Вообще мы видимъ, что разсматриваемое нами явленіе на самомъ дѣлѣ болѣе сложно, чѣмъ оно можетъ представиться на первый разъ. Вліяніе среды, въ которой возбуждено магнитное поле, на отношеніе къ этому полю различныхъ тѣлъ, находящихся въ этой средѣ, оказывается несомнѣннымъ. Изъ этого, очевидно, вытекаетъ, что и сама среда не можетъ не подвергаться какому-либо измѣненію. Что то такое должно происходить внутри этой среды, когда создается въ ней магнитное поле. Припоминая два характерныя въ произведенныхъ опытахъ направленія — осевое и экваторіальное, — невольно чувствуется, что направленіе, могущихъ проявиться при внесеніи магнитнаго полюса въ какую-либо среду, магнитныхъ силовыхъ линій и направленіе, поперечное имъ, имѣютъ значеніе и въ тѣхъ измѣненіяхъ, какимъ, по всей вѣроятности, подвергается и среда.

Я еще демонстрирую отношеніе висмута къ магнитному полю. Для настоящаго опыта отвинтимъ коническіе наконеч-

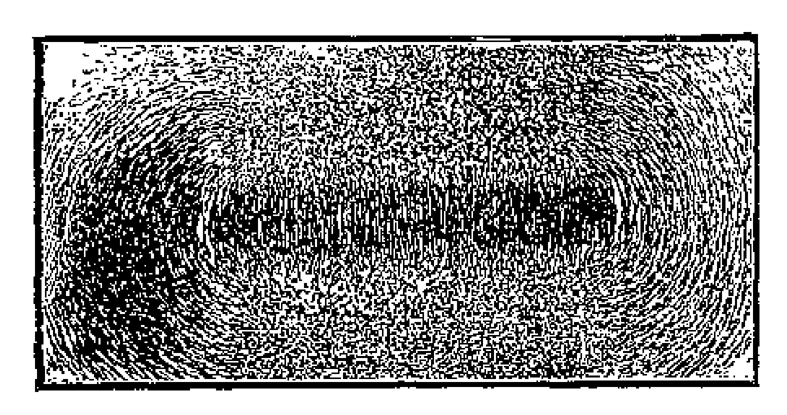


Рис. 17.

ники на полюсахъ электромагнита и сдвинемъ нѣсколько ближе другъ къ другу желѣзныя параллелепипеды. При посредствѣ

желѣзныхъ опилокъ опредѣлимъ направленія силовыхъ линій между полюсными поверхностями, т. е. въ пространствѣ между этими параллелепипедами. Какъ видимъ (рис. 17), эти направленія параллельны осевой линіи. Желѣзныя опилки расположились параллельными рядами отъ одной полюсной поверхности къ другой. Сдѣлаемъ тоже съ опилками висмута, для чего еще болѣе приблизимъ другъ къ другу желѣзные параллелепипеды. Мы видимъ (рис. 18), что опилки висмута оттолкнуты отъ желѣзныхъ па-

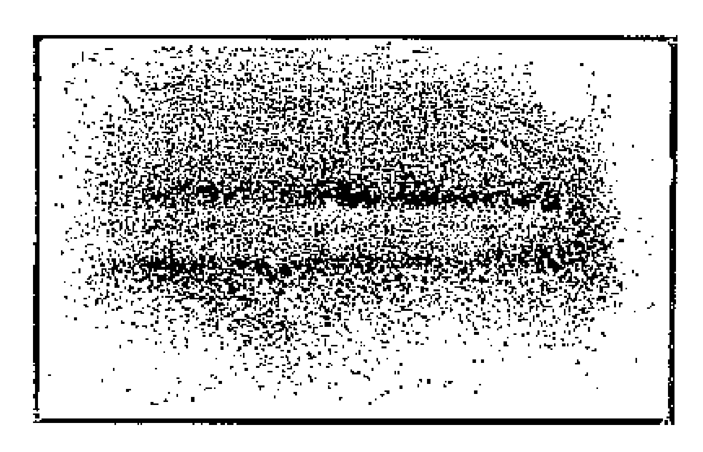


Рис. 18.

раллелепипедовъ и расположились въ видѣ хребта по экваторіальной линіи. Такъ должно быть, если вспомнить про діамагнитныя свойства висмута.

Перейдемъ къ разсмотрѣнію другихъ явленій, обнаруживающихся въ магнитномъ полѣ. Извѣстно, что всякое тѣло, пропускающее сквозь себя электрическій токъ, оказываетъ току большее или меньшее сопротивленіе. Въ самомъ дѣлѣ, введеніе любого проводника въ цѣпь электрическаго тока сопровождается всегда ослабленіемъ дѣйствій тока, т. е. уменьшеніемъ его силы; отсюда и выводятъ заключеніе объ электрическомъ сопротивленіи такого проводника.

Извѣстно также, что величина сопротивленія какого-нибудь даннаго проводника зависитъ въ значительной степени отъ состоянія, въ которомъ находится вещество его. Не говоря уже объ измѣненіи электрическаго сопротивленія при плавленіи или обращеніи въ паръ этого вещества, мы знаемъ, что самое незначительное повышеніе или пониженіе температуры, бо́льшее или

меньшее уплотненіе при сжатіи — все это сейчасъ же отражается и на электрическомъ сопротивленіи изслѣдуемаго проводника. Можно сказать вообще, что измѣненіе сопротивленія электрическому току какого-либо тѣла является чувствительнымъ признакомъ перемѣны внутренняго строенія этого тѣла.

Уже много лѣтъ старались обнаружить вліяніе магнитнаго поля на сопротивленіе току различныхъ металловъ. Сначала опыты давали результаты отрицательные, но уже въ 1856 г. извѣстный англійскій физикъ сэръ Вильямъ Томсонъ (нынѣ лордъ Кельвинъ) рядомъ разнообразныхъ опытовъ несомнѣннымъ образомъ установилъ, что желѣзныя и никкелевыя пластинки, помѣщенныя въ магнитное поле своею плоскостью параллельно силовымъ линіямъ, испытываютъ: *увеличеніе сопротивленія по направленію, совпадающему съ направленіемъ силовыхъ линій, и уменьшеніе сопротивленія по направленію, къ нимъ перпендикулярному.* Этотъ результатъ опытовъ Томсона подтвердился и позднѣйшими изслѣдованіями. Въ послѣдніе годы довольно много занимались этимъ вопросомъ. Оказалось, что помимо желѣза и никкеля и другія вещества чувствуютъ вліяніе магнитнаго поля на ихъ сопротивленіе. Такъ, по наблюденіямъ Шустера, и мѣдь, и коксъ, и свинецъ, и графитъ указываютъ, правда — незначительныя, измѣненія сопротивленія при этомъ. Но особенно сильно вліяніе магнитнаго поля на металлъ висмутъ. Оно настолько велико, что въ настоящее время пользуются въ электротехникѣ такимъ дѣйствіемъ магнитнаго поля на сопротивленіе висмута и по измѣненію этого сопротивленія выводятъ заключеніе о напряженіи магнитнаго поля. По изслѣдованіямъ Ленарда въ сильномъ магнитномъ полѣ и при обыкновенной температурѣ сопротивленіе висмута возрастаетъ почти на 75%. Я въ состояніи весьма легко демонстрировать этотъ фактъ. Изъ тонкой висмутовой проволоки приготовлена двойная плоская спираль. Она помѣщена между двумя слюде-



Рис. 19.

ными листочками (рис. 19). Концы спирали припаяны къ мѣднымъ узкимъ полоскамъ. Эту спираль введемъ въ одну изъ вѣт-

вей цѣпи, расположенной по извѣстной схемѣ мостика Уитстона и уравновѣсимъ ея сопротивленіе соотвѣтствующимъ сопротивленіемъ, находящимся въ другой, сопряженной вѣтви.

При замыканіи тока отъ одного элемента Даніеля мы не замѣчаемъ отклоненія свѣтлаго пятна, отбрасываемаго на экранъ зеркаломъ чувствительнаго гальванометра, находящемся въ самомъ мостикѣ. Я помѣщаю теперь висмутовую спираль между полюсами электромагнита такъ, что плоскость ея перпендикулярна направленію силовыхъ линій. Замыкаю токъ въ цѣпи Уитстона; мы видимъ большое отклоненіе пятна на экранѣ. Сопротивленіе спирали измѣнилось. Его можно опредѣлить, измѣнивъ сопротивленіе въ сопряженной вѣтви или измѣнивъ отношеніе сопротивленій двухъ остальныхъ вѣтвей. Не буду входить въ разсмотрѣніе этого. Скажу, что, пользуясь способомъ мостика Уитстона, мы легко найдемъ, на сколько увеличивается сопротивленіе висмутовой спирали при этомъ. Это увеличеніе весьма значительное [1]). Ленардъ производилъ опыты и съ прямою висмутовою проволокою и нашелъ, что сопротивленіе этой проволоки возрастаетъ и тогда, когда она помѣщается въ магнитномъ полѣ *по направленію силовыхъ линій*, хотя въ этомъ случаѣ *измѣненіе сопротивленія меньше*, чѣмъ при положеніи ея перпендикулярномъ силовымъ линіямъ. Особенно сильно увеличивается сопротивленіе висмута, когда висмутъ имѣетъ очень низкую температуру. Опыты Дюара и Флеминга показали, что при температурѣ — 186°, т. е. при температурѣ жидкаго воздуха, сопротивленіе висмутовой проволоки, помѣщенной поперекъ силовыхъ линій поля и при очень сильномъ напряженіи этого поля (22000 абсолютныхъ единицъ), возрасло болѣе, чѣмъ въ 150 разъ.

Итакъ, магнитное поле вліяетъ на сопротивленіе металловъ. Это явленіе не одинаково при различныхъ положеніяхъ метал-

---

[1]) Я приведу изъ статьи Ленарда (Lenard. Wied. Ann. XXXIX (1890) p. 619) нѣсколько числовыхъ данныхъ, показывающихъ измѣненія сопротивленія подобной висмутовой спирали въ полѣ различнаго напряженія. Употребленныя Ленардомъ различныя спирали изъ чистаго висмута имѣли сопротивленія отъ 6 до 25 омовъ. Принимая сопротивленіе спирали внѣ магнитнаго поля за 1, Ленардъ изъ опытовъ выводитъ слѣдующія величины сопротивленій этой спирали, когда она помѣщается въ магнитное поле различнаго напряженія:

напряж. маг. поля въ абсол. един.	0	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000
сопротивл. висмутовой спирали:	1	1,049	1,126	1,217	1,316	1,410	1,527	1,634	1,740.

лическаго проводника относительно силовыхъ линій. Отсюда несомнѣнно вытекаетъ, что въ магнитномъ полѣ металлъ испытываетъ какія-то молекулярныя измѣненія, не совсѣмъ одинаковыя въ различныхъ направленіяхъ относительно оси поля, т. е. относительно направленія силовыхъ линій. Не только металлы, но и разрѣженные газы подвергаются вліянію магнитнаго поля. Опыты Витца обнаружили, что сопротивленіе газа въ Гейсслеровой трубкѣ при прохожденіи чрезъ нее электрическаго тока также претерпѣваетъ измѣненіе. Оно увеличивается, если помѣстить Гейсслерову трубку между полюсами электромагнита перпендикулярно силовымъ линіямъ. Вліяніе поля на трубку, помѣщенную вдоль линій, оказывается ничтожнымъ.

Обращаюсь теперь къ новымъ фактамъ, явленіямъ особой важности. Вообразимъ, что между полюсами электромагнита, съ наконечниками въ видѣ параллелепипедовъ, мы помѣстили прямую проволоку по направленію параллельному экваторіальной линіи, а концы этой проволоки соединили съ гальванометромъ. Въ этомъ случаѣ, если бы мы стали двигать такую проволоку, *оставляя направленіе ея неизмѣненнымъ*, отъ одного полюса къ другому, т. е. вдоль силовыхъ линій, мы не замѣтили бы никакого особаго явленія въ гальванометрѣ. Я не дѣлаю этого опыта. Этотъ опытъ требуетъ большой осторожности. Теперь вообразимъ, что мы передвигаемъ эту проволоку какъ-нибудь иначе, не вдоль силовыхъ линій и не по направленію самой проволоки; въ этомъ случаѣ мы замѣтимъ тотчасъ же движеніе магнита въ гальванометрѣ, указывающее на появленіе тока въ проволокѣ. Этотъ токъ продолжается, пока мы двигаемъ проволоку и исчезаетъ, лишь только перестаемъ приводить ее въ движеніе. Я беру такую прямую проволоку, соединенную съ гальванометромъ. Даже въ сравнительно далекомъ разстояніи отъ электромагнита движеніе проволоки уже заставляетъ пятно, отбрасываемое зеркаломъ гальванометра на экранѣ, бѣгать по экрану. Я вношу проволоку въ пространство между полюсами электромагнита — пятно совсѣмъ сходитъ съ экрана, т. е. это показываетъ, что магнитъ въ гальванометрѣ повертывается на очень значительный уголъ. Итакъ, *движеніе проводника въ магнитномъ полѣ, когда это движеніе таково, что проводникъ какъ бы перерѣзываетъ тѣ нити, по которымъ въ этомъ полѣ располагаются желѣзныя опилки, т. е.*

перерѣзываетъ силовыя линіи, сопровождается появленіемъ тока въ этомъ проводникѣ. Этотъ токъ мы называемъ индукціоннымъ. Само явленіе возбужденія тока — индукціей. Открытіе индукціи, какъ, конечно, извѣстно каждому, принадлежитъ Михаилу Фарадэю. Оно сдѣлано имъ 29 августа (н. ст.) 1831 года. Мы знаемъ теперь, какія послѣдствія дало это открытіе Фарадэя! Электрическое освѣщеніе, передача работы на разстояніе, телефонія — все это производится при помощи индукціи тока!

Открытіе Фарадэемъ индукціи не случайное. Оно было предвидѣно Фарадэемъ, какъ слѣдствіе воззрѣнія его на способъ передачи магнитныхъ дѣйствій.

И въ самомъ дѣлѣ, если магнитныя дѣйствія передаются средою, среда должна подвергаться измѣненію, т. е. долженъ испытывать измѣненія въ своемъ состояніи эфиръ, наполняющій эту среду. Силовыя магнитныя линіи, очевидно, будутъ опредѣлять направленія, по которымъ должны происходить измѣненія въ эфирѣ. Такимъ образомъ, *силовыя линіи являются какъ бы осями деформацій, возбуждающихся въ эфирѣ отъ дѣйствія магнитовъ или токовъ, находящихся въ данномъ пространствѣ.* Понятно, что, если какой-либо проводникъ будетъ приведенъ въ движеніе въ магнитномъ полѣ и при своемъ движеніи будетъ перерѣзывать оси подобныхъ деформацій, проводникъ не будетъ оставаться безъ вліянія на него деформацій, существующихъ въ средѣ. Въ проводникѣ самомъ должно при этомъ произойти возмущеніе эфира, которое и вызоветъ въ немъ процессъ электрическаго характера. Этотъ процессъ несомнѣнно будетъ то, что̀ называемъ мы электрическимъ токомъ, ибо явленіе въ проводникѣ должно быть временное и состояніе эфира въ немъ, какъ уже сказано, должно подвергаться измѣненію. Процессъ въ проводникѣ прекратится, токъ исчезнетъ, какъ только проводникъ перестанетъ дальше перемѣщаться въ полѣ. Собственно не таково объясненіе давалось вначалѣ Фарадэемъ открытому имъ явленію индукціи токовъ, и не эта идея побудила его начать опыты въ извѣстномъ направленіи. Къ этой идеѣ Фарадэй пришелъ позже. Въ настоящее время мы знаемъ, насколько правдоподобна эта идея. Въ слѣдующей лекціи я снова вернусь къ явленіямъ индукціи токовъ и приведу основной законъ этихъ явленій. Теперь замѣчу лишь, что индукція тока въ проводникѣ,

движущемся въ магнитномъ полѣ или являющемся въ немъ, когда онъ находится въ покоѣ, но когда само поле подвергается измѣненію (напримѣръ, когда электромагнитъ намагничивается сильнѣе, или когда, напротивъ, намагниченіе его ослабѣваетъ), представляетъ весьма убѣдительный доводъ въ пользу предположенія существованія особыхъ измѣненій въ состояніи *эфира*, наполняющаго пространство магнитнаго поля. Я говорю *эфира* потому, что индукція наблюдается одинаково, какъ въ матеріальной средѣ, такъ и въ пустотѣ. Но, подобно тому, какъ въ явленіяхъ свѣта мы замѣчаемъ вліяніе различной матеріи на эфиръ, въ которомъ собственно возбуждаются свѣтовыя возмущенія, такъ и здѣсь, въ явленіяхъ индукціи, мы встрѣчаемъ совершенно подобное. Я не говорю о вліяніи тѣлъ, проводящихъ электричество на индукцію, которая происходитъ сквозь эти тѣла. Такія тѣла представляютъ собою въ иныхъ случаяхъ, какъ это показали знаменитые опыты Герца, экраны для индукціонныхъ дѣйствій, они не прозрачны, какъ говорятъ теперь, электрическимъ лучамъ. Я говорю о вліяніи матеріи среды, въ которой образуется магнитное поле и внутри которой наблюдается въ проводникѣ индукція, на большую или меньшую интензивность послѣдней. Такое вліяніе есть и въ иныхъ случаяхъ оно очень значительно. Одна и та же причина, создающая магнитное поле, вызываетъ далеко не одинаковое явленіе индукціи, смотря по тому, будетъ ли это поле создаваться въ воздухѣ или въ другой какой-нибудь матеріальной средѣ и особенно въ средѣ, проявляющей сильныя магнитныя свойства (желѣзо, никкель, растворъ солей желѣза и т. д.).

Все это, взятое вмѣстѣ, подтверждаетъ предположеніе объ измѣненіи состоянія эфира при возбужденіи магнитнаго поля, а слѣдовательно подтверждаетъ реальность существованія силовыхъ магнитныхъ линій и въ случаѣ отсутствія въ полѣ, непосредственно чувствующихъ магнитныя силы, желѣзныхъ массъ. — Въ самомъ дѣлѣ, если та или другая установка стержня, подвѣшеннаго на шелковинкѣ, въ магнитномъ полѣ еще можетъ быть объяснена допущеніемъ намагниченія этого стержня въ томъ или другомъ направленіи и затѣмъ дѣйствіемъ на возбужденный магнетизмъ, находящихся въ пространствѣ, магнитовъ или токовъ по закону Кулона или Ампера; если измѣненіе сопротивле-

нія металловъ можетъ быть также какъ-либо приписано измѣненію структуры ихъ подъ вліяніемъ подобныхъ дѣйствій магнитныхъ силъ на разстояніи, то уже индукція токовъ никакъ не объясняется подобнымъ образомъ. Правда, Веберъ пытался на основаніи своего закона взаимодѣйствія электрическихъ массъ, находящихся въ движеніи, вывести законъ индукціи токовъ, но теперь уже лишне говорить о теоріи Вебера, дающей выводы, какъ показалъ это Гельмгольтцъ, противные принципу сохраненія энергіи. Но еще болѣе, чѣмъ индукція токовъ, говоритъ за реальность силовыхъ линій въ магнитномъ полѣ явленіе *«намагничиванія лучей свѣта»*,—явленіе, также открытое Фарадэемъ. Я считаю полезнымъ, однако, привести раньше еще нѣкоторые опыты, такъ сказать, воочію убѣждающіе въ особенности состоянія среды въ магнитномъ полѣ.

Если между концами электромагнита подвѣсить на ниткѣ какой-нибудь металлическій предметъ, напримѣръ, шарикъ или кубикъ, и затѣмъ закрутить нитку, то, если электромагнитъ не намагниченъ, нитка станетъ раскручиваться и повѣшенный на ней предметъ придетъ во вращеніе съ увеличивающеюся скоростью. Но, если въ это время замкнуть токъ, намагничивающій электромагнитъ, то тотчасъ же уничтожается вращеніе металла, точно этотъ металлъ попадаетъ въ какую-то вязкую жидкость. Еще эффектнѣе опытъ, если подвѣсить между концами электромагнита толстую пластинку изъ красной мѣди, плоскостью перпендикулярно направленію силовыхъ линій, и привести эту пластинку въ колебаніе. Пока электромагнитъ не намагниченъ, эта пластинка свободно качается поперекъ силовыхъ линій, но стоитъ только возбудить магнитное поле, ея качаніе сейчасъ же уничтожается. Двигая пластинку рукою, мы почувствуемъ, какъ будто она находится въ густомъ маслѣ или въ какомъ-либо сиропѣ. Мы знаемъ теперь причину этого. Въ металлѣ при движеніи его въ магнитномъ полѣ возбуждаются индукціонные токи. На эти индукціонные токи дѣйствуетъ магнитное поле, оно стремится привести проводникъ, въ которомъ возбуждены индукціонные токи, въ опредѣленное положеніе — отсюда и сопротивленіе, оказываемое магнитнымъ полемъ, движенію въ немъ металла.

Особенно интересно дѣйствіе *перемѣннаго магнитнаго поля* на хорошо проводящія тѣла. Нѣсколько лѣтъ тому назадъ проф.

Элигю Томсонъ [1]) показалъ, что перемѣнное магнитное поле въ состояніи весьма сильно дѣйствовать на проводникъ *безъ* пропусканія по этому проводнику какого бы то ни было тока. Если взять катушку изъ толстой проволоки и, помѣстивъ ее вертикально, пропустить чрезъ нее сильный *перемѣнный* токъ (т. е. токъ, быстро мѣняющій направленіе), то подносимое сверху къ такой катушкѣ мѣдное кольцо станетъ замѣтно отталкиваться катушкой. Если внутрь катушки помѣстить пучекъ желѣзныхъ проволокъ, т. е. приготовить изъ нея электромагнитъ,—отталкиваніе мѣднаго кольца возрастетъ значительно (рис. 20). При до-

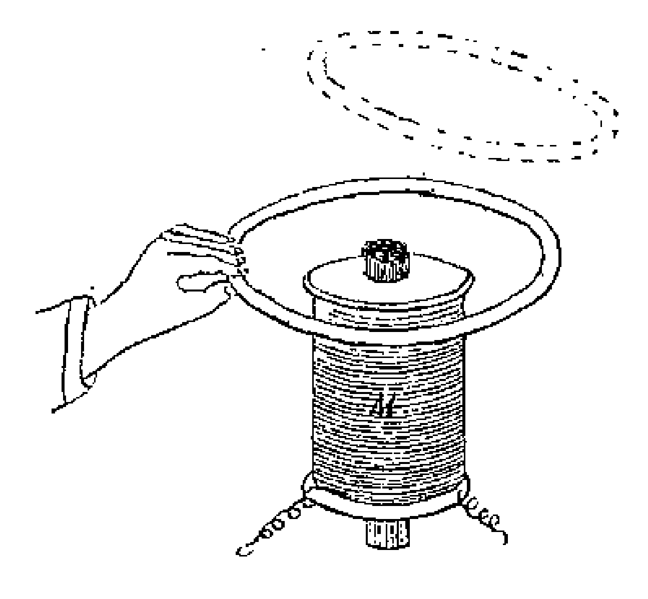


Рис. 20.

статочной силѣ перемѣннаго тока можно даже удержать толстое тяжелое кольцо висящимъ въ воздухѣ надъ такимъ электромагнитомъ (рис. 21). Варьируя условія опыта, можно получить весьма разнообразныя движенія проводящихъ тѣлъ отъ дѣйствія перемѣннаго магнитнаго поля, создаваемаго катушкою, питаемою перемѣннымъ токомъ. Любопытны движенія, какія получаются при этомъ въ ртути. Если налить ртуть въ плоскую круглую кюветку и помѣстить эту кюветку на верхнее основаніе вертикально поставленной катушки, то тотчасъ послѣ замыканія перемѣннаго тока въ этой катушкѣ обнаруживается своеобразное движеніе

[1]) Э. Томсонъ — современный американскій ученый.

ртути въ кюветкѣ. Въ ртути образуются два вихреобразныхъ теченія, сливающіяся въ одинъ потокъ по направленію діаметра кюветки. Чтобы удобнѣе наблюдать эти движенія, слѣдуетъ предварительно обсыпать поверхность ртути ликоподіемъ. Помѣстивъ *эксцентрично* подъ кюветку съ ртутью тонкій металлическій кружокъ, мы получимъ въ ртути два очень сильныхъ вихря съ общимъ потокомъ, имѣющимъ направленіе, параллельное діаметру подложеннаго кружка. Помѣстивъ *эксцентрично* подъ кюветку

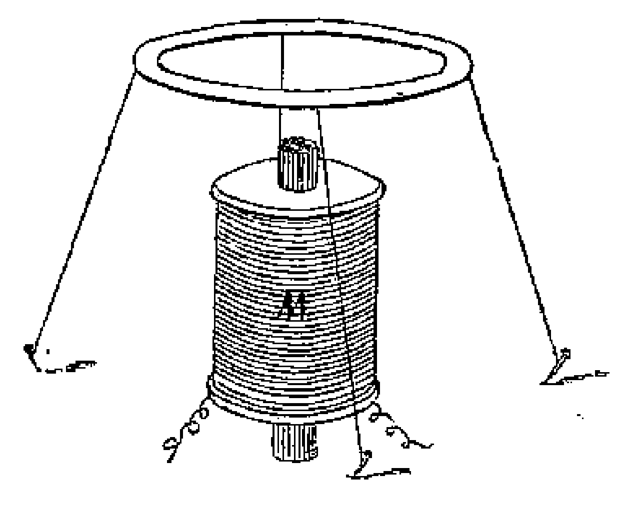


Рис. 21.

2, 3 кружка, мы замѣтимъ образованіе 4, 6 отдѣльныхъ вихрей, изъ которыхъ два сосѣднихъ вихря сливаются въ общій потокъ, направленный параллельно діаметру соотвѣтствующаго кружка. Подкладывая подъ ртуть проводящіе слои, различной формы и различнаго вещества, мы можемъ весьма значительно разнообразить движенія ртути въ кюветкѣ. — Всѣ эти явленія — результатъ индукціи токовъ, т. е. слѣдствіе развивающихся въ проводникахъ индукціонныхъ токовъ и дѣйствія на эти токи магнитнаго поля.

Перехожу теперь къ вліянію магнитнаго поля на свѣтовыя явленія. — Въ 1845 г. явился знаменитый мемуаръ Фарадэя «*О намагничиваніи свѣта и объ освѣщеніи магнитныхъ силовыхъ линій*» (On the Magnetisation of Light and Illumination of magnetic lines of force). Явленіе, открытое Фарадэемъ и описанное въ этомъ мемуарѣ, стали называть впослѣдствіи «*магнитнымъ вращеніемъ пло-*

скости поляризаціи свѣта». Я полагаю, однако, что оригинальное названіе этого явленія, сдѣланное Фарадэемъ, отлично характеризуетъ сущность его. — Идея, побудившая Фарадэя произвести рядъ изслѣдованій надъ вліяніемъ магнетизма на свѣтъ, та же, какая лежитъ въ основѣ всего ученія Фарадэя объ электричествѣ. Если магнитныя силовыя линіи имѣютъ реальное существованіе, если онѣ представляютъ собою оси особыхъ деформацій въ эфирѣ при возбужденіи магнитнаго поля, то лучи свѣта, т. е. въ дѣйствительности распространяющіяся въ эфирѣ возмущенія періодическаго характера, не могутъ не испытывать на себѣ вліянія деформацій магнитныхъ. Это вліяніе должно быть различно въ зависимости отъ относительнаго направленія луча свѣта и магнитныхъ силовыхъ линій. Опытъ вполнѣ подтвердилъ правильность подобнаго заключенія. Оказалось, что при распространеніи чрезъ какое-либо матеріальное тѣло по направленію магнитныхъ силовыхъ линій лучей прямолинейно поляризованнаго свѣта наблюдается измѣненіе плоскости поляризаціи свѣта, т. е. направленія, въ которыхъ происходятъ свѣтовыя возмущенія въ эфирѣ въ такихъ лучахъ, оставаясь перпендикулярными къ самимъ лучамъ, измѣняются относительно плоскости, въ какой происходили подобныя возмущенія до вступленія лучей свѣта въ магнитное поле. Поворотъ плоскости поляризаціи свѣта зависитъ отъ длины пути луча въ магнитномъ полѣ, отъ напряженія послѣдняго и, наконецъ, отъ вещества, чрезъ которое распространяется лучъ. До настоящаго времени въ свободномъ эфирѣ, т. е. въ пустотѣ, не удалось еще подмѣтить вращеніе плоскости поляризаціи. Быть можетъ, что въ этомъ случаѣ оно очень слабо, а потому и ускользаетъ пока отъ наблюденія. Вѣдь и въ газахъ только весьма недавно замѣтили и изслѣдовали это явленіе. При прохожденіи свѣта перпендикулярно силовымъ линіямъ совсѣмъ не происходитъ вращенія плоскости поляризаціи.

Чтобы демонстрировать описанное сейчасъ явленіе, замѣнимъ наконечники электромагнита другими, съ отверстіями по осевой линіи. Къ каждому изъ этихъ наконечниковъ придѣланы мѣдныя гильзы, въ которыя вставлены николевы призмы. Свѣтъ, выходящій изъ фонаря, проходитъ чрезъ первую николеву призму, поляризуется и, далѣе, выходя изъ отверстія полюснаго наконечника, попадаетъ въ четырехугольный сосудъ, наполнен-

ный особою жидкостью (растворъ іодистой ртути въ іодистомъ каліи) и помѣщенный между полюсами электромагнита, и затѣмъ чрезъ отверстіе другого наконечника вступаетъ во вторую николеву призму. Повертывая вторую николеву призму около луча, мы получаемъ такія положенія ея, при которомъ падающій на призму поляризованный свѣтъ сквозь нея не проходитъ. Бывшее раньше на экранѣ свѣтлое пятно исчезаетъ при этомъ. Пятно тотчасъ появляется, если только будетъ измѣнено положеніе первой призмы, т. е., если она будетъ повернута около направленія свѣтового луча. *То же самое наблюдается и безъ поворачиванія призмы при намагничиваніи электромагнита.*—Если расположить николевы призмы по направленію, составляющему прямой уголъ съ направленіемъ силовыхъ линій, т. е. по направленію линіи экваторіальной, и пропустить чрезъ нихъ свѣтъ, то мы не замѣтимъ никакого измѣненія въ яркости свѣтлаго пятна при возбужденіи магнитнаго поля.

Здѣсь взята особая жидкость для опыта вслѣдствіе того, что въ этомъ веществѣ особенно сильно происходитъ вращеніе плоскости поляризаціи свѣта. Опытъ былъ бы также удаченъ, если бы былъ помѣщенъ между полюсами электромагнита сѣрнистый углеродъ или тяжелое Фарадэевское стекло. Другія вещества дали бы болѣе слабое вращеніе.—Описанное явленіе не оставляетъ уже никакого сомнѣнія въ измѣненіи состоянія эфира по направленію силовыхъ магнитныхъ линій.

Въ связи съ магнитнымъ вращеніемъ плоскости поляризаціи находится другое свѣтовое явленіе, происходящее подъ вліяніемъ магнитнаго поля и наблюденное впервые только въ 1897 г. Зееманомъ. Это явленіе заключается въ измѣненіи *качества* свѣта, испускаемаго накаленными парами какого-либо металла, когда въ этихъ парахъ возбуждается сильное магнитное поле. Помѣстивъ пламя Бунзеновской горѣлки съ введенною въ него солью изслѣдуемаго металла между оконечностями большого электромагнита и изучая при посредствѣ сильно разсѣивающаго спектроскопа (при посредствѣ вогнутой диффракціонной рѣшетки) спектръ этого металла, Зееманъ обнаружилъ весьма существенное измѣненіе въ спектральныхъ линіяхъ, когда по обмоткѣ электромагнита проходилъ сильный токъ, т. е. когда между оконечностями электромагнита получалось магнитное поле

большого напряженія. Опыты показали, что при изслѣдованіи лучей свѣта *по направленію, параллельному силовымъ линіямъ поля,* т. е. когда лучи падали на диффракціонную рѣшетку, пройдя сквозь осевое отверстіе въ наконечникѣ электромагнита, возбужденіе поля производило *раздвоеніе* каждой линіи въ спектрѣ металла, причемъ раздвоеніе происходило такъ, что одна линія получалась соотвѣтствующею болѣе короткой длинѣ волны, чѣмъ первоначальная, другая—на столько же болѣе длинной. Разность между длинами волнъ двухъ появлявшихся линій оказалась тѣмъ больше, чѣмъ сильнѣе было напряженіе магнитнаго поля. Кромѣ раздвоенія спектральныхъ линій, получается въ разсматриваемомъ случаѣ еще другое измѣненіе въ свойствѣ свѣта, а именно, обѣ линіи, являющіяся при возникновеніи магнитнаго поля вмѣсто одной какой-либо линіи спектра, оказываются поляризованными по кругу, причемъ одна изъ нихъ имѣетъ правую круговую поляризацію, другая—лѣвую.

Итакъ, *магнитное поле измѣняетъ періодъ колебанія эфира въ лучахъ свѣта, испускаемыхъ источникомъ вдоль силовыхъ линій этого поля, создавая изъ одного луча опредѣленнаго періода два луча двухъ разныхъ періодовъ, одного—большаго, другого—меньшаго, и, кромѣ этого, оно вызываетъ взаимно противоположную круговую поляризацію въ двухъ этихъ лучахъ, причемъ въ лучѣ, котораго періодъ болѣе короткій, круговое движеніе эфира для наблюдателя, смотрящаго по направленію силовыхъ линій поля, представляется происходящимъ по направленію движенія часовой стрѣлки.*

При изслѣдованіи лучей свѣта, распространяющихся *по направленію, перпендикулярному силовымъ линіямъ поля*, оказывается, что возбужденіе такого поля обращаетъ каждую спектральную линію въ три отдѣльныя линіи, причемъ средняя изъ этихъ трехъ линій остается на томъ же мѣстѣ, на которомъ была первоначальная линія, двѣ же боковыя линіи являются одинаково отстоящими отъ этой средней. Въ этомъ случаѣ такъ же, какъ и въ выше упомянутомъ, разность длинъ волнъ, соотвѣтствующихъ двумъ боковымъ линіямъ, измѣняется пропорціонально напряженію магнитнаго поля. *Всѣ эти три линіи, на которыя отъ дѣйствія магнитнаго поля на источникъ свѣта распадается какая-либо изслѣдуемая спектральная линія, являются поляризованными, причемъ въ средней линіи плоскость поляризаціи перпенди-*

кулярна направленію силовыхъ линій поля, въ обѣихъ боковыхъ линіяхъ плоскость поляризаціи параллельна силовымъ линіямъ.

Я не въ состояніи демонстрировать явленіе Зеемана передъ всей аудиторіей. Оно можетъ быть наблюдаемо только каждымъ въ отдѣльности. Кромѣ того, для наблюденія этого явленія въ такомъ видѣ, какъ его изслѣдовалъ самъ Зееманъ и затѣмъ другіе ученые, т. е. чтобы можно было замѣтить все, что сообщено мною, необходимъ весьма сильный электромагнитъ и очень сильно разсѣивающая свѣтъ диффракціонная рѣшетка. Но есть возможность обнаружить вліяніе магнитнаго поля на качество свѣта, испускаемаго накаленными парами, и безъ такой рѣшетки, и безъ употребленія особенно сильнаго электромагнита. Возьмите двѣ Бунзеновскихъ горѣлки, одну съ большимъ пламенемъ, другую съ маленькимъ пламенемъ. Введите въ оба эти пламена соль натрія и помѣстите большое пламя между оконечностями электромагнита. Когда вы будете разсматривать маленькое пламя на фонѣ большого пламени, и при этомъ не будете пропускать токъ по обмоткѣ электромагнита, то *вамъ будутъ казаться темными внѣшніе края маленькаго пламени.* Это происходитъ отъ того, что свѣтъ, испускаемый большимъ пламенемъ, поглощается внѣшними желтыми слоями маленькаго пламени. Но пропустите теперь токъ чрезъ электромагнитъ, т. е. возбудите магнитное поле въ томъ мѣстѣ, гдѣ находится большое натріево пламя, вы сейчасъ же замѣтите, что потемнѣніе краевъ маленькаго пламени исчезло; *все пламя будетъ казаться одинаково свѣтлымъ.* Въ этомъ случаѣ магнитное поле, возбужденное внутри большого натріева пламени, измѣняетъ длину волны тѣхъ лучей, которые исходятъ изъ этого пламени. Эти лучи являются уже *иными*, чѣмъ лучи, испускаемые маленькимъ пламенемъ. А потому это второе пламя и не можетъ поглощать лучей, которые отличны отъ его собственныхъ.

Я не вхожу въ объясненіе явленія Зеемана. Отъ чего бы ни происходило это явленіе, оно даетъ намъ фактъ, показывающій, что *возникновеніе магнитныхъ силовыхъ линій внутри накаленнаго пара вызываетъ измѣненіе въ свѣтовыхъ деформаціяхъ эфира, происходящихъ въ этомъ парѣ, и что это измѣненіе находится въ тѣсной зависимости съ направленіемъ силовыхъ линій.*

Послѣ всего сказаннаго, кажется, что данное мною опредѣленіе силовой линіи, какъ оси особой деформаціи, при воз-

никновенія магнитнаго поля возбуждающейся въ эфирѣ, представляется въ значительной степени вѣроятнымъ. А въ такомъ случаѣ, само магнитное поле должно быть разсматриваемо, какъ пространство, въ которомъ возникли подобныя деформаціи. Всѣ дѣйствія и явленія, наблюдаемыя въ такомъ полѣ, будутъ уже лишь результатомъ этихъ деформацій. Подобнымъ же образомъ возможно представлять себѣ и электрическое поле. Я подразумѣваю подъ электрическимъ полемъ—пространство, въ которомъ наблюдаются электрическія дѣйствія: притяженіе и отталкиваніе наэлектризованныхъ тѣлъ, электрическая индукція и т. д. До сихъ поръ мы не знаемъ, въ чемъ состоятъ тѣ деформаціи эфира, которыя мы называемъ магнитными и электрическими. Они несомнѣнно возникаютъ, но сущность ихъ, ихъ механическій характеръ остаются для насъ неизвѣстны. Существуетъ, однако, какая то связь между тѣми и другими деформаціями, выражающаяся въ томъ, что появленіе или, такъ сказать, *измѣненіе однѣхъ деформацій сопровождается всегда возбужденіемъ другихъ деформацій*. Въ самомъ дѣлѣ всякое измѣненіе электрическаго поля вызываетъ магнитныя силы и, обратно, измѣненіе магнитнаго поля сопровождается электрическими дѣйствіями. Послѣднее, впрочемъ, пока выводится только теоретически. Попытка Лоджа констатировать это явленіе на опытѣ была не совсѣмъ удачна и не дала надежныхъ результатовъ. Весьма вѣроятною является гипотеза Максвелля, по которой *магнитныя деформаціи представляютъ собою вихревыя движенія въ эфирѣ*. Въ этомъ случаѣ силовыя магнитныя линіи будутъ осями такихъ вихрей. Напряженіе магнитнаго поля, т. е. величина могущихъ проявиться въ немъ магнитныхъ силъ, будетъ зависѣть отъ скорости этого вихреваго движенія.—Не будемъ, однако, останавливаться на гипотезахъ и предоставимъ будущимъ изслѣдованіямъ опредѣлить характеръ магнитныхъ деформацій. Но, если мы еще не знаемъ самой сущности этихъ деформацій, то, тѣмъ не менѣе, нѣкоторыя свойства ихъ для насъ извѣстны. Еще Фарадэй, впервые высказавшій идею о силовыхъ линіяхъ, уподоблялъ эти линіи натянутымъ эластичнымъ нитямъ, при чемъ считалъ, что *сосѣднія силовыя линіи взаимно отталкиваютъ другъ друга*. Максвелль на основаніи теоріи упругости показалъ полную необходимость этого. Максвелль теоретически вывелъ, что по направленію силовой линіи среда,

въ которой возбуждены такія линіи, должна испытывать натяженіе, а по направленію перпендикулярному—давленіе. *Величины натяженія и давленія, отнесенныя къ единицѣ поверхности, въ какомъ либо мѣстѣ магнитнаго поля пропорціональны квадрату величины магнитной силы въ этомъ мѣстѣ, т. е. силы, какую будетъ испытывать въ данномъ мѣстѣ магнитный полюсъ съ количествомъ магнетизма, принимаемымъ за единицу; при одной и той-же величинѣ этой магнитной силы онѣ различны для различныхъ матеріальныхъ средъ. Онѣ больше для средъ, лучше намагничивающихся, и меньше для средъ, намагничивающихся слабо* [1]). Подобныя свойства деформацій въ магнитномъ полѣ объясняютъ всѣ тѣ явленія, какія мы наблюдаемъ въ этомъ полѣ. Притяженіе противоположныхъ полюсовъ двухъ магнитовъ представляетъ собою результатъ стремленія силовыхъ линій укоротиться вслѣдствіе существующаго вдоль ихъ натяженія. Отталкиваніе одноименныхъ полюсовъ является слѣдствіемъ боковыхъ давленій силовыхъ линій, исходящихъ изъ обоихъ полюсовъ. Вообще, сравнительно весьма легко можно разобраться въ всѣхъ случаяхъ механическихъ дѣйствій магнитнаго поля на внесенные въ него магниты или проводники съ токами, если только принять въ соображеніе распредѣленіе и свойство силовыхъ линій и обратить вниманіе на измѣненіе самаго поля дѣйствіемъ помѣщенныхъ въ него магнитовъ или токовъ.

Для иллюстраціи свойствъ силовыхъ линій — вполнѣ достаточно напомнить характеръ магнитныхъ спектровъ, показанныхъ на прошлой лекціи. Въ самомъ дѣлѣ, мы видѣли, что расположеніе опилокъ въ различныхъ случаяхъ магнитнаго поля даетъ возможность вывести заключеніе какъ о стремленіи силовыхъ линій принять наименьшую длину, такъ и о боковомъ воздѣйствіи этихъ линій. Боковое давленіе силовыхъ линій я могу еще иначе демонстрировать при помощи опыта, произведеннаго Квинке. Между полюсами электромагнита я помѣщаю вертикальную стек-

---

[1]) Для изотропной среды, по Максвеллю, величина натяженія (на единицѣ поверхности) вдоль силовой линіи и давленія перпендикулярно къ ней выражается чрезъ: $P = \frac{\mu}{8\pi} \mathfrak{H}^2$, здѣсь $\mathfrak{H}$ — магнитная сила, дѣйствующая на единицу магнетизма въ данномъ мѣстѣ, а μ—магнитная проницаемость среды.

лянную трубочку, соединенную посредствомъ стеклянной трубки, отогнутой два раза подъ прямымъ угломъ, со стекляннымъ сосудомъ. Этотъ сосудъ и соединенныя съ нимъ трубки я наполняю растворомъ хлорнаго желѣза. Жидкости наливаю столько чтобы она въ вертикальной трубкѣ поднялась до высоты уровня середины магнитнаго поля. Въ моментъ замыканія тока въ электромагнитѣ вы наблюдаете поднятіе жидкости въ вертикальной трубкѣ. Какъ только токъ размыкается, жидкость снова опускается до прежняго своего положенія. Квинке даетъ слѣдующее объясненіе этому явленію. Въ магнитномъ полѣ, въ которомъ находится трубка съ жидкостью, магнитныя силовыя линіи горизонтальны. Часть ихъ проходитъ чрезъ воздухъ въ трубкѣ, часть ихъ идетъ чрезъ жидкость. Какъ уже сказано раньше, боковое давленіе силовыхъ линій въ растворѣ хлорнаго желѣза должно быть больше, чѣмъ въ воздухѣ [1]). Такимъ образомъ на поверхности раздѣла жидкости и воздуха давленіе снизу вверхъ сильнѣе, чѣмъ сверху внизъ — отсюда и повышеніе жидкости въ трубкѣ до тѣхъ поръ, пока увеличенное гидростатическое давленіе не уравновѣситъ разность давленій магнитныхъ [2]).

Итакъ, мы ознакомились съ силовыми линіями, существующими въ магнитномъ полѣ. Мы принимали ихъ начинающимися (какъ бы исходящими) на той части поверхности магнита, гдѣ наблюденіе обнаруживаетъ сѣверный магнетизмъ и оканчивающимися тамъ, гдѣ мы встрѣчаемъ магнетизмъ южный. Только въ случаяхъ магнитнаго поля, создаваемаго токами, безъ желѣза внутри окружающаго его проводника, магнитныя силовыя линіи представлялись намъ вполнѣ замкнутыми линіями, обхватывающими собою проводники. Но такъ ли это? Имѣемъ ли мы право поверхность магнита или вообще намагниченнаго тѣла считать за предѣлъ существующихъ внѣ его силовыхъ линій? Не должно ли предположить силовыя линіи продолжающимися и внутри намагниченнаго тѣла, т. е. и въ этомъ случаѣ разсматривать сило-

---

[1]) Для концентрованнаго раствора хлорнаго желѣза

$$\mu = 1 + 4\,\pi .\, 0{,}00004.$$

Для воздуха $\mu = 1$.

[2]) Обозначая чрезъ h поднятіе жидкости, чрезъ σ — ея плотность и чрезъ g — ускореніе силы жидкости, имѣемъ: $h\,\sigma\,g = \frac{\mu - 1}{8\,\pi}.\mathfrak{H}^2$. Поэтому явленію возможно измѣреніе $\mathfrak{H}$, если извѣстна μ.

выя линіи, какъ замкнутыя? Такъ именно смотрѣлъ на нихъ Фарадэй. Да и въ самомъ дѣлѣ понятно, что, относя всѣ дѣйствія магнитнаго поля къ особымъ, возникающимъ въ немъ, деформаціямъ эфира, мы тѣмъ самымъ и намагничиваніе стали, желѣза и другихъ тѣлъ должны приписать подобнымъ же деформаціямъ, возбуждающимся внутри этихъ тѣлъ, какъ и обратно магнитныя деформаціи, существующія въ этихъ тѣлахъ, должны считать за причину деформацій, образующихся внѣ ихъ. Однимъ словомъ, приходится допустить, что внутри магнита существуетъ подобное же магнитное поле, какъ и внѣ его. Итакъ, силовая линія, выходящая изъ сѣвернаго конца магнита, возвращается въ него на южномъ концѣ и продолжается дальше внутри магнита снова къ сѣверному концу его. Силовыя линіи, проявляющія себя внѣ магнита различными дѣйствіями, составляютъ лишь часть замкнутаго *потока* силовыхъ линій, пронизывающаго внутренность магнита. Вотъ окончательный выводъ, къ которому необходимо приходится притти.

Можно представить цѣлый рядъ косвенныхъ доводовъ въ пользу предположенія существованія силовыхъ линій (точнѣе — *линій индукціи)* или, лучше, особыхъ деформацій эфира, отражающихся и на свойствахъ самой матеріи, внутри намагниченнаго тѣла. Въ самомъ дѣлѣ, мы можемъ сказать, теперь, что всѣ свойства тѣла измѣняются, когда это тѣло намагничивается. Я уже говорилъ, что намагничиваніе желѣзныхъ, никкелевыхъ и кобальтовыхъ стержней сопровождается измѣненіемъ длины ихъ, что намагничиваніе вліяетъ на крученіе желѣзныхъ проволокъ. Я показалъ опытъ, который обнаружилъ значительное измѣненіе электрическаго сопротивленія висмута при намагничиваніи этого тѣла. Я могу сказать, что уже доказано измѣненіе теплопроводности нѣкоторыхъ тѣлъ подъ вліяніемъ магнитныхъ силъ. Весьма вѣроятно, что намагниченіе тѣла вызываетъ измѣненія теплоемкости этого тѣла. Отъ намагниченія желѣза весьма замѣтно измѣняется термоэлектрическая способность этого тѣла. Подверженное прерывчатому намагничиванію желѣзо нагрѣвается. Наконецъ, при намагничиваніи желѣза, никкеля и кобальта обнаруживается весьма сильное вращеніе плоскости поляризаціи проходящаго сквозь нихъ поляризованнаго свѣта. Этотъ фактъ сталъ извѣстенъ сравнительно недавно. Только въ 1886 году удалось

Кундту приготовить тонкіе прозрачные слои желѣза, никкеля и кобальта и подвергнуть ихъ изслѣдованію въ отношеніи вращенія плоскости поляризаціи свѣта при намагничиваніи. Нынѣ благодаря работамъ Керра, мы знаемъ, что и при отраженіи свѣта отъ поверхности намагниченнаго желѣза происходитъ вращеніе плоскости поляризаціи. Итакъ, всѣ эти факты, а, особенно, открытіе Кундта, много говорятъ за правильность высказаннаго положенія о замкнутомъ магнитномъ потокѣ. Прибавлю еще, что подобно тому, какъ вліяютъ на оптическія свойства какого либо тѣла тѣ измѣненія, какимъ подвергается это тѣло, такъ же точно отражается и на намагниченіи всякое измѣненіе, какое производится въ изслѣдуемомъ тѣлѣ. Давно извѣстно, что нагрѣваніе ослабляетъ магнетизмъ постояннаго магнита и, напротивъ, повышеніе температуры до извѣстнаго предѣла способствуетъ болѣе сильному намагничиванію желѣза при дѣйствіи на него тока. Растяженіе, сжатіе, крученіе, даже простое сотрясеніе — все это вліяетъ на намагниченіе. Особенно интересенъ недавно обнаруженный Гопкинсономъ фактъ. Сплавъ желѣза съ никкелемъ (замѣтимъ, оба тѣла, и желѣзо, и никкель, сильно магнитны), содержащій 25% никкеля, можетъ проявлять діаметрально противоположныя свойства. Если подобный сплавъ предварительно сильно охладить, онъ оказывается магнитнымъ веществомъ. Если же его нагрѣть, то послѣ нагрѣванія этотъ сплавъ вполнѣ теряетъ способность намагничиваться и пріобрѣтаетъ эту способность лишь только тогда, когда вновь будетъ подверженъ охлажденію.

Все сказанное мною до сихъ поръ относится лишь до качественной характеристики магнитнаго поля и внутренняго состоянія намагниченныхъ тѣлъ. Хотя и приходилось нѣсколько разъ упоминать о болѣе сильномъ и болѣе слабомъ магнитномъ полѣ, но пока еще не дано опредѣленія того, что̀ можетъ служить *количественною* характеристикою этого поля, что̀ выражаетъ собою, какъ говорятъ теперь, мѣру напряженія магнитнаго поля; равнымъ образомъ еще не дано и указаній на то, что̀ численно опредѣляетъ намагниченіе какого-либо тѣла. Къ установкѣ количественной характеристики магнитнаго поля и степени намагниченія какого-либо тѣла я и перейду теперь.

Понятно, что количественное опредѣленіе магнитнаго поля должно основываться на тѣхъ явленіяхъ, какія наблюдаются въ немъ.

Какъ мы уже знаемъ, одно изъ этихъ явленій есть дѣйствіе на магнитный полюсъ, внесенный въ магнитное поле. Правда, мы не можемъ помѣстить въ магнитномъ полѣ *одинъ* только полюсъ, мы имѣемъ дѣло всегда съ цѣльнымъ магнитомъ т. е. съ двумя различными магнетизмами, мысленно сосредоточенными на обоихъ концахъ стрѣлки или стерженька. Но изъ наблюденія надъ дѣйствіемъ поля на цѣлый магнитъ не трудно, путемъ простого расчета, опредѣлить и ту силу, какую долженъ испытывать каждый изъ полюсовъ взятаго магнита, чтобы дѣйствіе на магнитъ было то, какое оказывается на него на самомъ дѣлѣ. Положимъ дальше, что намъ извѣстно *количество магнетизма* въ полюсахъ этого магнита. Понятіе *количество магнетизма* тѣсно связано съ прежнимъ взглядомъ на магнитныя дѣйствія и единица этого количества можетъ быть установлена на основаніи закона Кулона [1]). *Раздѣляя найденную величину силы, испытываемой полюсомъ магнита, на количество магнетизма въ этомъ полюсѣ, мы получимъ силу, какую испытываетъ въ изучаемомъ магнитномъ полѣ каждая единица магнетизма полюса. Величина этой силы и принимается за характеристику магнитнаго поля въ данномъ мѣстѣ.* Она носитъ названіе *напряженія* магнитнаго поля въ данной точкѣ. Ясно, что напряженіе магнитнаго поля въ какомъ либо мѣстѣ опредѣляетъ величину деформаціи, произведенной въ эфирѣ въ этомъ мѣстѣ.

Итакъ: направленія силовыхъ магнитныхъ линій опредѣляютъ направленія силъ, какія будетъ испытывать магнитный полюсъ

---

[1]) По закону Кулона два одноименныхъ магнитныхъ полюса отталкиваютъ другъ друга *въ пустотѣ* съ силою: $f = k\frac{m\,m'}{r^2}$, здѣсь m и m' обозначаютъ количества магнетизма въ полюсахъ, r—разстояніе между ними, а k—нѣкоторый коэффиціентъ, величина котораго опредѣляется выборомъ единицъ для количества магнетизма, разстоянія и силы.

Пусть $k=1$, а два полюса обладаютъ однимъ и тѣмъ же количествомъ магнетизма, т. е. пусть $m = m'$, тогда мы будемъ имѣть $f = \frac{m^2}{r^2}$, а отсюда получаемъ: $m = r\sqrt{f}$.

Если за единицу разстоянія возьмемъ 1 сантиметръ, а за единицу силы одинъ динъ, то при $r = 1$ с. м. и $f = 1$ имѣемъ и $m = 1$. Итакъ: *единица количества магнетизма есть такое количество, которое на равное себѣ и находящееся въ разстояніи одного сантиметра, количество дѣйствуетъ съ силою, равною одному дину.*

въ различныхъ точкахъ поля; напряженія поля въ этихъ точкахъ выражаютъ численно эти силы.

Вообразимъ, что въ магнитномъ полѣ мы въ состояніи провести силовыя линіи. Конечно число проводимыхъ силовыхъ линій можетъ быть вполнѣ произвольно. Но мы условимся проводить ихъ опредѣленнымъ образомъ, а именно: *вообразимъ въ каждомъ мѣстѣ магнитнаго поля столько силовыхъ линій, что число ихъ, разсчитанное* (по пропорціональности) *на единицу* (1 *кв. с. м.*) *поверхности, мысленно построенной перпендикулярно направленію этихъ линій, будетъ равно напряженію магнитнаго поля въ этомъ мѣстѣ.* Легко видѣть, что такой пріемъ построенія силовыхъ линій даетъ возможность вполнѣ графически характеризовать поле. Этотъ способъ былъ предложенъ впервые Фарадэемъ.

Съ такимъ способомъ изображенія магнитнаго поля связано понятіе о числѣ силовыхъ линій, пронизывающихъ какую либо поверхность въ этомъ полѣ,—понятіе, дающее возможность просто и кратко формулировать законы всѣхъ различныхъ, вызываемыхъ въ магнитномъ полѣ, явленій. Въ слѣдующей лекціи я подробнѣе остановлюсь на явленіи индукціи токовъ. Теперь скажу, что какъ теоретически, такъ и путемъ опытовъ, установленъ слѣдующій основный законъ индукціи: *въ данный моментъ времени величина электродвижущей силы, вызывающей въ замкнутомъ проводникѣ индукціонный токъ, численно выражается быстротою измѣненія числа силовыхъ магнитныхъ линій, пронизывающихъ поверхность, ограниченную замкнутымъ проводникомъ, какъ контуромъ.* (Подъ словомъ быстрота здѣсь понимается *измѣненіе числа силовыхъ линій, отнесенное къ единицѣ времени*). Такимъ образомъ полная электродвижущая сила за нѣкоторый промежутокъ времени, опредѣляемая на опытѣ по *количеству* электричества, протекшаго въ это время чрезъ сѣченіе проводника, опредѣлитъ все измѣненіе числа силовыхъ линій, пронизывающихъ поверхность внутри замкнутаго проводника.

Зная величину этой поверхности и умѣя опредѣлять полную электродвижущую силу индукціи,—мы въ состояніи измѣрить *число силовыхъ линій въ какомъ либо мѣстѣ поля.* Различные способы представляются для этого. Возьмемъ маленькое, незамкнутое, металлическое кольцо или, лучше, небольшую, малой высоты,

катушку изъ проволоки (эту катушку можно разсматривать какъ составленную изъ отдѣльныхъ колецъ; поверхность, ограниченная оборотами этой катушки, будетъ равна суммѣ площадей каждаго ея оборота), соединимъ концы катушки съ баллистическимъ гальванометромъ и помѣстимъ ее въ изучаемое мѣсто магнитнаго поля, помѣстимъ такъ, чтобы силовыя линіи были нормальны къ плоскостямъ оборотовъ ея. Когда магнитное поле возбуждено, выведемъ быстро катушку изъ поля. Въ катушкѣ возникнетъ электродвижущая сила индукціи и появившійся индукціонный токъ произведетъ отклоненіе магнита въ гальванометрѣ. Наблюденіе этого отклоненія и дастъ намъ возможность опредѣлить число силовыхъ линій, пронизовавшихъ всѣ обороты катушки въ ея первоначальномъ положеніи, а слѣдовательно разсчитать и число силовыхъ линій, приходящихся на единицу поверхности, перпендикулярной силовымъ линіямъ, т. е. дастъ возможность найти напряженіе магнитнаго поля въ данномъ мѣстѣ. Если магнитное поле можно уничтожить или, если оно не возбуждено, создать, то въ такомъ случаѣ достаточно, оставляя катушку неподвижною, замѣтить отклоненіе магнита въ гальванометрѣ при уничтоженіи поля или при его возникновеніи, а отсюда, какъ и въ описанномъ сейчасъ способѣ, является возможность опредѣлить число силовыхъ линій уничтожающихся или появляющихся внутри катушки.—Замѣняя маленькую катушку большимъ кольцомъ, мы въ состояніи, по наблюденію индукціи въ немъ, опредѣлить все число силовыхъ линій, пронизывающихъ это кольцо, въ состояніи, какъ говоримъ теперь, измѣрить *напряженность магнитнаго потока*, окруженнаго этимъ кольцомъ.

Подобный путь изслѣдованія магнитнаго поля даетъ возможность безъ особыхъ затрудненій изучить распредѣленіе напряженія по всему магнитному полю, даетъ возможность прослѣдить, говоря языкомъ ученія Фарадэя, распространеніе силовыхъ линій въ этомъ полѣ. Такой способъ изслѣдованія магнитнаго поля и привелъ къ весьма простому закону, касающемуся магнитнаго потока.

Я долженъ ввести теперь новый терминъ, часто употребляющійся въ настоящее время. Этотъ терминъ—*магнитная цѣпь*.

Магнитная цѣпь представляетъ собою совокупность всего, по чему распространяются силовыя магнитныя линіи, образуемыя

какою-либо причиною, подобно тому, какъ гальваническая цѣпь представляетъ собою систему проводниковъ, по которымъ проходитъ токъ отъ какого-либо электровозбудителя.

Главная причина, создающая силовыя магнитныя линіи, мы знаемъ, есть токъ въ какомъ нибудь проводникѣ или, чаще на практикѣ, въ катушкѣ. Но есть и другая причина, это—постоянные магниты. Пока оставимъ послѣднюю причину безъ разсмотрѣнія.

Первое заключеніе, къ какому приводитъ изученіе магнитной цѣпи по способу, только что изложенному, т. е. при помощи измѣренія индукціонной электродвижущей силы въ соотвѣтствующихъ проводникахъ, чрезвычайно важно и находится въ полномъ соотвѣтствіи съ положеніемъ Фарадэя о силовыхъ линіяхъ, какъ линіяхъ замкнутыхъ. Это заключеніе слѣдующее. *Магнитная цѣпь во всѣхъ случаяхъ является замкнутою*—вполнѣ аналогично цѣпи электрическаго тока. Если опредѣлить *полное число силовыхъ линій, пронизывающихъ поперечное сѣченіе магнитной цѣпи въ различныхъ сѣченіяхъ ея, то окажется, что въ любомъ сѣченіи цѣпи* число силовыхъ магнитныхъ линій *будетъ одно и то же*, если, конечно, причина, создающая магнитную цѣпь, остается во время опыта неизмѣнною. Здѣсь снова аналогія съ электрическимъ токомъ. *Полное число силовыхъ магнитныхъ линій выражаетъ силу магнитнаго потока. Эта сила магнитнаго потока, какъ и сила электрическаго тока, постоянна для всякаго сѣченія цѣпи.*

Эта сила магнитнаго тока, какъ и сила электрическаго тока измѣняется отъ двухъ обстоятельствъ: причины, создающей разсматриваемый потокъ, и свойства, т. е. размѣровъ магнитной цѣпи и веществъ, изъ которыхъ она образуется. Однимъ словомъ и въ отношеніи магнитнаго потока является возможнымъ говорить: о силѣ, которая возбуждаетъ потокъ (*магнитодвижущая сила*), и о сопротивленіи, которое представляетъ ему цѣпь (*магнитное сопротивленіе*).

Разнообразные и многочисленные опыты, въ особенности англійскихъ физиковъ (Роуландъ, Бозанке, Каппъ, братья Гопкинсонъ, Хивизайдъ и др.), даютъ возможность формулировать законъ магнитной цѣпи вполнѣ подобно закону Ома для электрическаго тока. *Сила магнитнаго потока выражается отношеніемъ величины магнитодвижущей силы къ величинѣ магнитнаго сопротивленія цѣпи.*—Магнитодвижущая сила въ цѣпи, какъ по-

казываетъ теорія, а главнымъ образомъ опыты, пропорціональна суммѣ произведеній числа оборотовъ проволоки во всѣхъ замкнутыхъ проводникахъ, создающихъ магнитный потокъ, на соотвѣтствующія этимъ проводникамъ силы токовъ (силы токовъ должны быть взяты со знакомъ плюсъ или минусъ, смотря потому, въ какомъ направленіи идутъ токи въ отдѣльныхъ замкнутыхъ проводникахъ по отношенію къ образованнымъ силовымъ линіямъ). Магнитное сопротивленіе цѣпи опредѣляется такъ же, какъ и гальваническое сопротивленіе цѣпи: оно выражается суммою сопротивленій отдѣльныхъ частей цѣпи, каждое изъ которыхъ зависитъ отъ длины разсматриваемой части, ея поперечника и вещества, изъ котораго состоитъ эта часть [1]).

Я долженъ замѣтить, однако, что, какъ ни простъ законъ магнитнаго потока, примѣненіе его на практикѣ часто весьма затруднительно. Это не то, что вычисленіе силы электрическаго тока въ какой либо цѣпи. Затрудненіе выражается въ опредѣленіи сопротивленія магнитной цѣпи.

Входящій въ вычисленіе магнитнаго сопротивленія какой либо части цѣпи коэффиціентъ, зависящій отъ вещества этой части (*магнитная проницаемость*) и подобный коэффиціенту проводимости электрическаго тока, для всѣхъ тѣлъ, называемыхъ нами сильно магнитными (желѣзо, сталь, чугунъ, никкель, кобальтъ), не остается, какъ это будетъ для электрической проводимости, однимъ и тѣмъ же при различныхъ силахъ магнитнаго потока.

---

[1]) Формула магнитнаго потока:

$$Z = \frac{4\,\pi . 10^{-1} . \Sigma mi}{\Sigma \frac{l}{\mu\, s}}$$

Здѣсь Z—сила магнитнаго потока во всей цѣпи;

m—число оборотовъ въ какой-либо намагничивающей катушкѣ;

i—сила тока въ этой катушкѣ, выраженная въ амперахъ;

l—длина цилиндрической части магнитной цѣпи, выраженная въ сантиметрахъ;

s—ея поперечное сѣченіе, выраженное въ квадратныхъ сантиметрахъ;

μ—магнитная проницаемость этой части — коэффиціентъ, соотвѣтствующій коэффиціенту проводимости электрическаго тока. Эта величина μ для тѣлъ сильно магнитныхъ, какъ желѣзо, измѣняется вмѣстѣ съ силою магнитнаго потока. Магнитная проницаемость сильно магнитныхъ тѣлъ есть функція силы магнитнаго потока.

Напротивъ, онъ весьма значительно измѣняется съ измѣненіемъ силы магнитнаго потока: сначала при малыхъ силахъ послѣдняго возрастаетъ вмѣстѣ съ возрастаніемъ силы потока, а далѣе замѣтно уменьшается. Но самая главная трудность въ вычисленіи сопротивленія магнитной цѣпи заключается въ томъ, что по отношенію къ магнитному потоку нѣтъ тѣлъ, аналогичныхъ непроводникамъ тока электрическаго. Если желѣзо, сталь, чугунъ и другія тѣла могутъ быть названы хорошими проводниками магнитнаго потока, то и воздухъ, и стекло, и всѣ прочія тѣла также являются проводниками такого потока. Вслѣдствіе этого происходитъ такъ называемая магнитная утечка, т. е. распространеніе силовыхъ магнитныхъ линій изъ хорошихъ проводниковъ магнитнаго потока (желѣзо) въ сторону, въ среду, окружающую эти тѣла. Однимъ словомъ, въ большей части случаевъ магнитный потокъ уподобляется не электрическому току, проходящему по какой либо, даже съ развѣтвленіями, металлической цѣпи, а уподобляется току, распространяющемуся по металлическимъ проводникамъ, помѣщеннымъ не изолированными въ проводящей жидкости.

Мнѣ нѣсколько разъ пришлось выражаться, что желѣзо, чугунъ, сталь, никкель, кобальтъ — хорошіе проводники магнитнаго тока, т. е. магнитная проницаемость ихъ велика. Весьма легко демонстрируется подобное свойство этихъ тѣлъ. Для этого достаточно помѣстить между полюсами электромагнита вдоль силовыхъ линій стерженекъ изъ такихъ металловъ и опредѣлить число силовыхъ линій, пронизывающихъ сѣченіе этого стерженька и число силовыхъ линій, пронизывающихъ то же самое сѣченіе поля, когда стерженекъ будетъ удаленъ. Сдѣлавъ подобный опытъ, мы убѣдимся, на сколько больше будетъ проходить силовыхъ линій чрезъ подобныя, сильно магнитныя, тѣла сравнительно съ тѣмъ, сколько проходитъ ихъ чрезъ воздухъ. Вообще помѣщеніе желѣза въ какомъ либо мѣстѣ магнитнаго поля между полюсами электромагнита сопровождается, какъ это легко показать при посредствѣ индукціи, измѣненіемъ въ распредѣленіи силовыхъ линій. Эти линіи какъ бы устремляются въ желѣзо, какъ бы встрѣчаютъ въ немъ меньшее сопротивленіе своему существованію. Понятно, что все это необходимо считать выраженіемъ болѣе сильныхъ магнитныхъ деформацій, возбуждающихся

въ эфирѣ внутри желѣза и другихъ сильно магнитныхъ тѣлъ, сравнительно съ деформаціями, возникающими въ эфирѣ, въ воздухѣ или въ какомъ либо другомъ слабо магнитномъ тѣлѣ. Согласно подобному взгляду на магнитныя явленія, *тѣла діамагнитныя нужно разсматривать, какъ тѣла, въ которыхъ магнитная проницаемость меньше, чѣмъ магнитная проницаемость пустого пространства.*

Еще одна отличительная особенность магнитнаго потока сравнительно съ токомъ электрическимъ. По прекращеніи причины, вызывающей электрическій токъ, исчезаетъ и токъ. Не то въ нѣкоторыхъ случаяхъ наблюдается въ магнитномъ потокѣ. Мы знаемъ, что стальной и даже желѣзный стержень, вложенный въ катушку, по которой проходитъ электрическій токъ, остается намагниченнымъ, т. е. внутри его остаются существующими силовыя линіи и по прекращеніи тока въ катушкѣ. Такимъ образомъ возбужденныя электрическимъ токомъ магнитныя деформаціи въ стали и желѣзѣ сохраняются въ нихъ и тѣмъ самымъ поддерживаютъ деформацію и во внѣшнемъ пространствѣ неопредѣленно долгое время. Такое остаточное намагничиваніе тѣлъ или, лучше, такой остаточный магнитный потокъ не имѣетъ ничего подобнаго себѣ въ процессахъ тока электрическаго.

Мнѣ остается упомянуть еще о томъ, что, согласно съ ученіемъ о магнитномъ потокѣ, можетъ служить мѣрою намагниченія тѣла. Понятно, что подобною характеристикою необходимо принять полное число силовыхъ магнитныхъ линій, пронизывающихъ данное тѣло. Распредѣленіе «свободнаго магнетизма» на поверхности намагниченнаго тѣла по этой теоріи представляетъ собою распредѣленіе выхода изъ этого тѣла силовыхъ линій.

Я кончаю этимъ свой краткій обзоръ ученія о магнитной цѣпи. Болѣе подробное изложеніе законовъ магнитнаго потока можно найти въ прекрасномъ сочиненіи Сильвануса Томпсона «*Электромагнитъ и электромагнитные механизмы*», переведенномъ М. А. Шателеномъ и изданномъ А. И. Смирновымъ.

Въ заключеніе своей лекціи я не могу не упомянуть еще разъ имени Михаила Фарадэя. Мы видѣли, сколько сдѣлано открытій этимъ знаменитымъ физикомъ въ области электрическихъ явленій. Можно смѣло сказать, что большая часть всего, чѣмъ пользуемся мы нынѣ въ электротехникѣ, и весьма многое, что

служитъ намъ въ теоріи электричества для выясненія столь важныхъ, но въ то же время и столь еще загадочныхъ явленій электричества и магнетизма, принадлежитъ всецѣло генію Фарадэя. Еще долгое время мы будемъ жить плодами трудовъ этого славнаго философа природы, всю жизнь свою безкорыстно посвятившаго наукѣ! 10 сентября 1891 года исполнилось сто лѣтъ со дня рожденія Фарадэя. Наше физическое отдѣленіе Русскаго Физико-Химическаго Общества чествовало въ этотъ день въ своемъ засѣданіи память Фарадэя и украсило лаврами портретъ великаго ученаго. Закончу и я настоящую лекцію выраженіемъ удивленія передъ силою и мощью ума этого безсмертнаго философа, котораго даже внѣшній обликъ глубоко симпатиченъ.

Лекція 4-я.

Въ этой и слѣдующей лекціи я разсмотрю нѣкоторыя наиболѣе важныя примѣненія электричества къ практикѣ. Возбужденіе тока при посредствѣ динамомашинъ, передача этого тока на большое разстояніе и, наконецъ, приведеніе въ движеніе при помощи электрическаго тока механизмовъ, способныхъ производить полезную работу, — вотъ вопросы, къ тому же наиболѣе существенные въ электротехникѣ, которые будутъ мною затронуты. Я ограничусь, однако, разсмотрѣніемъ всего этого лишь съ чисто научной, физической стороны и не стану входить въ детальное описаніе техническаго устройства самихъ машинъ и другихъ приборовъ.

Въ основѣ практическаго осуществленія всѣхъ трехъ намѣченныхъ вопросовъ лежатъ два физическихъ явленія: индукція токовъ и механическое дѣйствіе магнитнаго поля на проводникъ, по которому проходитъ токъ. Эти то два явленія и должны прежде всего обратить на себя наше вниманіе.

Мы видѣли въ прошлую лекцію, что во всякомъ проводникѣ, движущемся въ магнитномъ токѣ, является индукціонный токъ, если только движеніе проводника таково, что проводникъ при этомъ пересѣкаетъ силовыя магнитныя линіи. Къ такому положенію пришелъ Фарадэй на основаніи опытовъ, то же самое можетъ быть выведено и теоретически. Я не имѣю возможности здѣсь строго доказать правильность сказаннаго, ибо потребовалось бы много времени на это. Я хочу лишь выяснить физическое основаніе этого.

Представимъ себѣ какое либо магнитное поле и вообразимъ, что въ немъ построены силовыя линіи. Мы можемъ принять, что каждая силовая линія по существу своему представляетъ направленіе оси деформаціи, возбужденной въ эфирѣ поля. Эти деформаціи будутъ неодинаковы въ различныхъ мѣстахъ про-

странства, чѣмъ и опредѣляется неодинаковое напряженіе магнитнаго поля въ различныхъ его точкахъ. Мы помнимъ, что величину деформаціи или, проще, величину магнитнаго напряженія поля мы согласились характеризовать числомъ силовыхъ линій, проведенныхъ чрезъ единицу поверхности, перпендикулярной силовымъ линіямъ. Положимъ же, что такимъ образомъ проведены силовыя линіи къ каждой части магнитнаго поля. Оматеріализуемъ эти воображаемыя линіи, уподобимъ ихъ какимъ либо тонкимъ волокнамъ. Представимъ далѣе, что у насъ имѣется очень узкій ножъ; станемъ двигать этотъ ножъ въ пространствѣ заполненномъ такими натянутыми волокнами. Для всякаго ясно, что перемѣщеніе ножа будетъ неодинаково легко происходить смотря по тому, перерѣзываетъ ли этотъ ножъ при своемъ движеніи волокна или нѣтъ и, если перерѣзываетъ ихъ, то какъ, въ бóльшемъ или меньшемъ числѣ. При всякомъ разрѣзѣ волокна ножу сообщится отъ тренія нѣкоторое количество тепла и ножъ нагрѣется, при чемъ явившееся въ извѣстное время тепло въ немъ будетъ зависѣть отъ числа перерѣзанныхъ имъ волоконъ.

Вообразимъ же теперь, что въ нашемъ магнитномъ полѣ мы приводимъ въ движеніе какой либо проводникъ. Когда проводникъ движется вдоль силовыхъ линій, *не пересѣкая послѣднія*, деформаціи, возбужденныя въ полѣ по направленію этихъ силовыхъ линій, остаются въ той же средѣ, въ томъ же эфирѣ поля. Но, какъ только проводникъ пересѣчетъ какую либо силовую линію, онъ раздѣлитъ собою эту линію, а слѣдовательно *въ эфирѣ этого проводника* должна возбудиться деформація, соотвѣтствующая деформаціи внѣшней среды. Не трудно представить, что возбужденіе и исчезновеніе подобныхъ магнитныхъ деформацій въ эфирѣ проводника при послѣдовательномъ пересѣченіи силовыхъ линій должны выразиться особымъ электрическимъ процессомъ въ самомъ проводникѣ. Уже было упомянуто, что измѣненіе магнитныхъ деформацій создаетъ деформаціи электрическія. Отсюда и вытекаетъ заключеніе о возможности появленія при этомъ тока и, конечно, тока, ограничивающагося временемъ, въ теченіе котораго проводникъ пересѣкаетъ силовыя линіи. Чѣмъ большее число силовыхъ линій въ извѣстное время перерѣзывается проводникомъ при его движеніи, тѣмъ должна быть и бóльшая причина для возбужденія индукціоннаго тока, тѣмъ, между прочимъ,

и труднѣе будетъ перемѣщать проводникъ въ полѣ. Вѣдь являющійся въ проводникѣ токъ выдѣляетъ тепло, а слѣдовательно, по закону сохраненія энергіи, при этомъ требуется совершеніе эквивалентной работы.

Вотъ, хотя, конечно, не строгое, объясненіе возможности возникновенія явленія индукціи при опредѣленномъ перемѣщеніи проводника въ магнитномъ полѣ. Очевидно, что все останется въ такомъ же видѣ, если не проводникъ движется, а магнитное поле само измѣняетъ свое положеніе относительно проводника или, наконецъ, если все пребываетъ въ покоѣ, но магнитное поле измѣняется по напряженію и возникающія или исчезающія силовыя линіи въ немъ перерѣзываются проводникомъ.

На основаніи разнообразныхъ опытовъ Фарадэй вывелъ законъ индукціи, математически доказанный Максвеллемъ и подтвержденный многими точными изслѣдованіями. *Причина индукціоннаго тока въ каждой части проводника*, т. е. *появляющаяся электродвижущая сила индукціи, во всякій моментъ времени пропорціональна числу перерѣзываемыхъ этою частью проводника силовыхъ магнитныхъ линій, разсчитанному на единицу времени*[1]). Направленіе индукціоннаго тока, *который явился бы* въ этой части проводника отъ электродвижущей силы индукціи, также всегда вполнѣ опредѣленное. Весьма легко запоминается правило, данное для этого Фарадэемъ. *Вообразивъ себя плывущимъ по направленію силовыхъ линій съ лицомъ обращеннымъ въ сторону относительнаго движенія проводника, мы будемъ наблюдать индукціонный токъ въ разсматриваемой части проводника происходящимъ слѣва направо* (рис. 22).

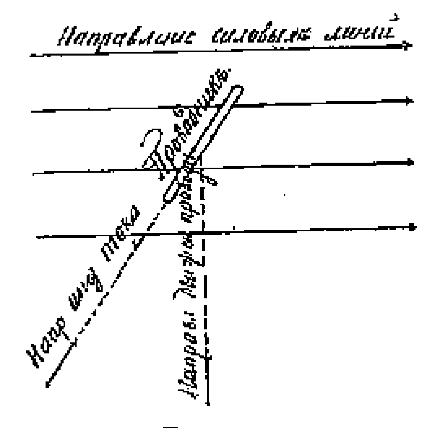


Рис. 22.

Понятно, что развивающаяся электродвижущаяся сила индукціи во всемъ проводникѣ представится суммою электродвижу-

[1]) Въ абсолютныхъ магнитныхъ единицахъ электродвижущая сила индукціи, являющаяся въ данный моментъ времени въ какой либо части проводника, выражается формулою: $e = \frac{dn}{dt}$, здѣсь dn — число перерѣзываемыхъ этою частью проводника силовыхъ линій въ теченіе времени dt.

щихъ силъ, возникающихъ въ отдѣльныхъ частяхъ этого проводника, при чемъ въ этой суммѣ отдѣльные члены войдутъ съ положительными или отрицательными знаками смотря по тому, какое направленіе имѣлъ бы индукціонный токъ, отдѣльно являющійся въ каждой такой части, по отношенію ко всему проводнику.

Формулировка основнаго закона индукціи, данная Фарадэемъ, весьма удобная для нахожденія электродвижущей силы въ какой либо движущейся части замкнутой цѣпи, не представляется удобною въ томъ случаѣ, когда требуется вычислить электродвижущую силу, которая возникаетъ во всемъ *замкнутомъ* проводникѣ, приводимомъ въ движеніе въ магнитномъ полѣ или помѣщенномъ въ измѣняющемся магнитномъ полѣ. Въ этомъ случаѣ гораздо удобнѣе представляется законъ индукціи въ слѣдующей редакціи Максвелля: *Электродвижущая сила индукціи, развивающаяся въ какой либо моментъ времени въ замкнутомъ проводникѣ, пропорціональна разсчитанному на единицу времени измѣненію числа силовыхъ линій, пронизывающихъ поверхность, ограниченную замкнутымъ проводникомъ, какъ контуромъ*[1]. Направленіе индукціон-

[1] Въ абсолютныхъ магнитныхъ единицахъ электродвижущая сила являющаяся въ какой либо данный моментъ времени въ замкнутомъ проводникѣ, выражается формулою:

$$e = -\frac{dN}{dt}.$$

Здѣсь N—алгебраическая сумма чиселъ силовыхъ линій (взятыхъ со знаками + или — въ зависимости отъ направленія линій), пронизывающихъ поверхность, ограниченную замкнутымъ проводникомъ, какъ контуромъ; dt — элементъ времени.

Сила индукціоннаго тока въ соотвѣтственный моментъ времени выражается чрезъ $i = \frac{e}{r}$, гдѣ r сопротивленіе проводника. Общее количество электричества, протекающаго въ замкнутой цѣпи въ теченіе нѣкотораго конечнаго промежутка времени T секундъ, такъ называемая *интегральная сила индукціоннаго тока* (J), выразится чрезъ $J = \int_0^T i.\,dt = \frac{1}{r}\int_0^T e.\,dt$. Входящее сюда выраженіе $\int_0^T e.\,dt = E$ *называется интегральною электродвижущею силою индукціи*, развивающеюся въ промежутокъ времени T въ замкнутомъ проводникѣ.

наго тока опредѣляется слѣдующимъ образомъ. *Вообразивъ себя стоящимъ передъ замкнутымъ проводникомъ и смотрящимъ по направленію пронизывающихъ его силовыхъ линій, мы будемъ наблюдать токъ въ проводникѣ по направленію движенія часовой стрѣлки, если число силовыхъ линій пронизывающихъ поверхность внутри замкнутаго проводника уменьшается, и по направленію обратному, если это число возрастаетъ* (рис. 23).

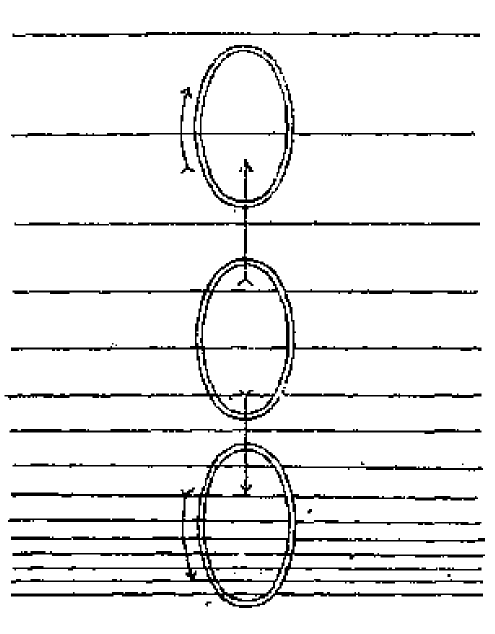


Рис. 23.

Легко видѣть, что подобная формула закона индукціи выводится непосредственно изъ формулы Фарадэя. Въ самомъ дѣлѣ, электродвижущая сила индукціи, являющаяся въ извѣстный моментъ въ замкнутомъ проводникѣ, представляетъ собою сумму электродвижущихъ силъ, возникающихъ въ каждой части этого проводника. Раздѣлимъ же мысленно проводникъ, *смотря на него вдоль силовыхъ линій*, на двѣ части: верхнюю и нижнюю. Въ той и другой части, при пересѣченіи ихъ по направленію снизу вверхъ силовыми линіями, развивается электродвижущая сила, которая, согласно правилу Фарадэя, имѣетъ направленіе слѣва направо, вслѣдствіе чего электродвижущая сила, возникающая во всемъ замкнутомъ проводникѣ выразится разностью этихъ двухъ силъ. Если верхняя часть нашего проводника будетъ перерѣзана бо́льшимъ числомъ силовыхъ линій, чѣмъ нижняя, въ проводникѣ получится токъ, соотвѣтствующій направленію электродвижущей силы въ этой верхней части, т. е. слѣва направо *для нея* или,

Изъ выраженія для e получимъ $E = -\int_0^\tau \frac{dN}{dt}\,dt = N_1 - N_2$.

Электродвижущая сила принимается положительною, если вызываемый ею въ проводникѣ токъ для наблюдателя, смотрящаго по направленію силовыхъ линій, число которыхъ въ выраженіи N взято съ положительнымъ знакомъ, кажется происходящимъ по направленію движенія часовой стрѣлки.

лучше, по движенію часовой стрѣлки; если, напротивъ, число перерѣзывающихъ силовыхъ линій будетъ больше для нижней части, то и токъ во всемъ проводникѣ будетъ имѣть направленіе, совпадающее съ направленіемъ слѣва направо *для нижней части* проводника, т. е. обратно движенію часовой стрѣлки. Очевидно, что въ первомъ случаѣ разность электродвижущихъ силъ для верхней и нижней части нашего проводника будетъ какъ разъ пропорціональна *уменьшенію* числа силовыхъ линій внутри контура проводника — вѣдь эта разность будетъ пропорціональна разности чиселъ перерѣзанныхъ силовыхъ линій обѣими частями замкнутаго проводника, при чемъ больше ихъ перерѣзано верхнею частью, т. е. вышло изъ контура проводника, чѣмъ перерѣзано нижнею, т. е. вошло внутрь контура. Во второмъ случаѣ, обратно, разность электродвижущихъ силъ для двухъ частей проводника или электродвижущая сила для всего замкнутаго проводника выразится величиною, пропорціональною *увеличенію* числа силовыхъ линій внутри контура проводника.

Итакъ, формула Максвелля представляетъ лишь слѣдствіе закона Фарадэя.

Встрѣчаются, однако, случаи, для которыхъ, какъ показываютъ и теорія, и опытъ, вполнѣ справедлива формула закона индукціи, данная Максвеллемъ, и для которыхъ, *повидимому*, какъ бы не примѣнима совсѣмъ формулировка Фарадэя. Въ самомъ дѣлѣ, вообразимъ очень длинный желѣзный стержень, обмотанный проволокой или, еще лучше, возьмемъ желѣзное кольцо, сплошь окруженное правильно навитою на него проволокою. Когда мы пропустимъ по проволокѣ токъ, то какъ въ первомъ случаѣ, такъ, въ особенности, во второмъ—силовыя линіи пойдутъ исключительно по желѣзу, т. е. внутри намагничивающей катушки, внѣ желѣза ихъ не будетъ. Въ послѣднемъ можемъ убѣдиться при помощи желѣзныхъ опилокъ. Но, мы знаемъ, что въ проводникѣ, окружающемъ желѣзо, при всякомъ измѣненіи силы намагничивающаго это желѣзо тока вызывается индукція. Было даже сказано, что по величинѣ электродвижущей силы индукціи (измѣряя ее въ такъ называемыхъ *абсолютныхъ единицахъ*) при замыканіи намагничивающаго тока или его размыканіи — мы опредѣляемъ полное число силовыхъ линій, являющихся или исчезающихъ при этомъ внутри желѣзнаго сердеч-

ника, т. е. судимъ объ этомъ числѣ, прямо пользуясь формулой закона индукціи Максвелля. Можетъ представиться сомнѣніе въ приложимости въ этомъ случаѣ закона Фарадэя. Можетъ показаться, что въ данномъ случаѣ не происходитъ перерѣзыванія силовыхъ линій самимъ проводникомъ, а значитъ, не прилагается и объясненіе самого процесса развитія индукціоннаго тока, какое дано раньше. Я по опыту знаю, что это затрудняетъ многихъ, начинающихъ изучать явленія электричества, а потому позволяю себѣ нѣсколько остановиться на разсмотрѣніи подобнаго случая. А случай этотъ очень важенъ! Мы встрѣтимся съ нимъ при разсмотрѣніи трансформаторовъ. Всякое затрудненіе, однако, исчезаетъ, если мы прослѣдимъ за возникновеніемъ силовыхъ линій съ самаго момента ихъ зарожденія и вспомнимъ тѣ свойства, какія необходимо приписать имъ.

Въ разсматриваемыхъ случаяхъ причину образованія магнитнаго потока внутри желѣзнаго сердечника составляетъ появленіе тока въ окружающей этотъ сердечникъ намагничивающей катушкѣ. Но мы знаемъ, что появленіе тока въ какомъ-либо проводникѣ сопровождается возникновеніемъ вокругъ этого проводника силовыхъ линій, имѣющихъ форму замкнутыхъ колецъ, окружающихъ проводникъ. Я напоминаю расположеніе желѣзныхъ опилокъ вокругъ прямолинейнаго проводника съ токомъ. Мы видѣли, что опилки располагаются при этомъ по кругамъ, имѣющимъ общій центръ въ

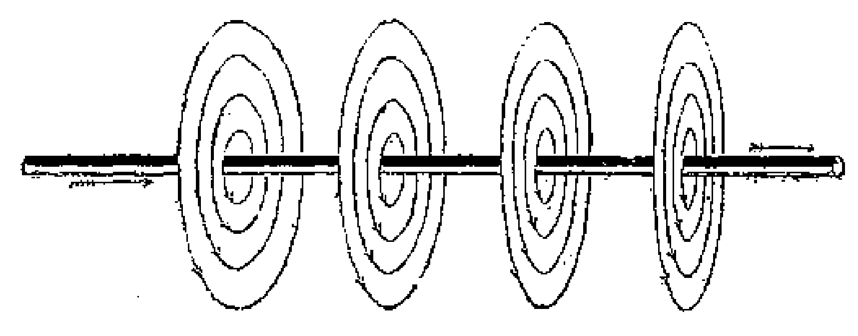


Рис. 24.

серединѣ поперечника проводника. На рис. 24 изображенъ такой проводникъ съ образовавшимися вокругъ его силовыми линіями.

Представимъ себѣ теперь кольцевую или, все равно, очень длинную прямую катушку. Каждый оборотъ проволоки такой катушки надо разсматривать, какъ отдѣльный проводникъ. При

пропусканіи тока по этой катушкѣ (рис. 25) должны *около каждаго оборота ея* возбудиться въ окружающей средѣ деформаціи, интензивность которыхъ, понятно, опредѣлится свойствомъ этой среды, т. е. около каждаго оборота должны образоваться, согласно тому, какъ мы условились выражаться, силовыя линіи, опредѣленнымъ образомъ распредѣленныя вокругъ этого оборота. Замѣтимъ, что такъ будетъ для каждаго оборота. На рис. 25 толстая спираль изображаетъ катушку, причемъ стрѣлки указываютъ направленіе тока въ ней; системы колецъ вокругъ витковѣ этой

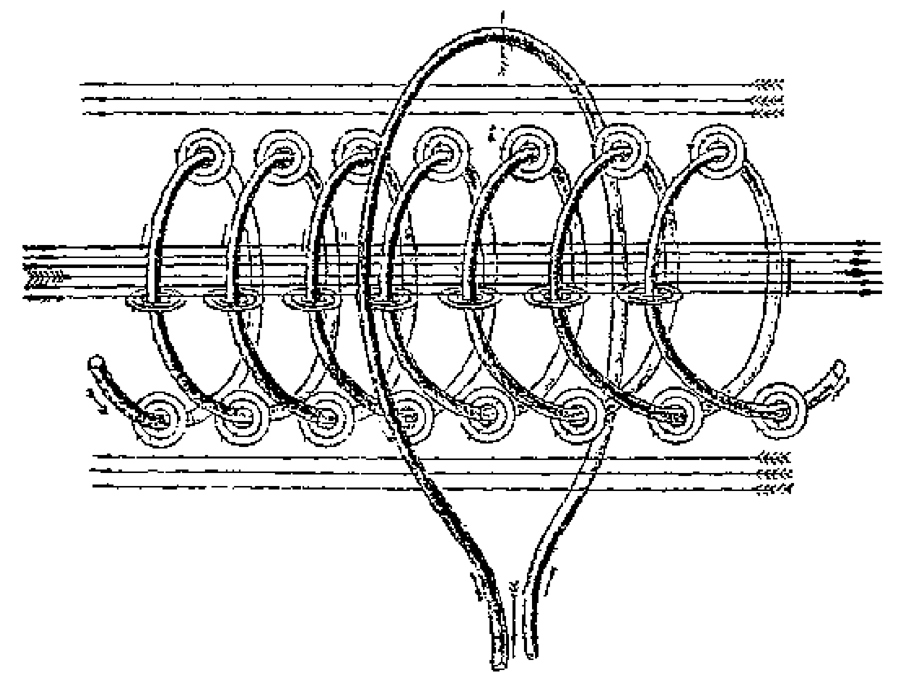


Рис. 25.

спирали изображаютъ возникающія силовыя линіи. Если мы обратимъ вниманіе на направленіе силовыхъ линій, соотвѣтствующихъ двумъ сосѣднимъ оборотамъ намагничивающей катушки, мы увидимъ, что эти направленія въ ближайшихъ другъ къ другу частяхъ прямо противоположны. Но намъ извѣстно, что силовыя линіи, противоположнаго направленія, стягиваясь по своей длинѣ, какъ бы притягиваются другъ къ другу, стремятся слиться другъ съ другомъ. (Вспомнимъ расположеніе опилокъ желѣза между двумя одноименными полюсами магнитовъ). Итакъ, въ самый моментъ образованія силовыхъ колецъ около двухъ сосѣднихъ оборотовъ

они сольются другъ съ другомъ и обхватятъ собою оба оборота. Такъ же будетъ и для слѣдующихъ оборотовъ. Возникающія около слѣдующихъ другъ за другомъ оборотовъ силовыя кольцевыя линіи какъ бы разрываются и сливаются въ двѣ системы линій внутри и внѣ катушки. Нѣчто подобное мы увидимъ на поверхности воды, если бросимъ въ воду одновременно и близко другъ къ другу нѣсколько камешковъ. Кольцевыя волны, возбужденныя паденіемъ въ воду каждаго камешка, сольются вмѣстѣ и мы уже не увидимъ системы расходящихся кольцевыхъ волнъ, а будемъ наблюдать двѣ прямыя волны, бѣгущія въ противоположныя стороны. Итакъ, при появленіи тока въ катушкѣ должны образоваться двѣ системы силовыхъ линій, прямо противоположнаго направленія: одна—внутри катушки, другая—внѣ ея. Очевидно, что число возникающихъ силовыхъ линій тамъ и здѣсь должно быть одинаково, ибо происхожденіе ихъ одно и то же. Но изъ этихъ двухъ системъ силовыхъ линій только одна внутренняя можетъ остаться. Силовыя линіи одного направленія взаимно отталкиваются, а потому внѣшнія силовыя линіи будутъ отброшены на безконечность, т. е. возбудившаяся здѣсь деформація среды, передаваясь отъ слоя къ слою, въ концѣ исчезнетъ, а слѣдовательно *окружающій катушку проводникъ будетъ перерѣзанъ тѣмъ числомъ силовыхъ линій, какое возникло внутри его контура, и удерживается взаимнымъ давленіемъ другъ на друга силовыхъ линій и дѣйствіемъ процесса въ проводникѣ, т. е. проходящимъ въ немъ электрическимъ токомъ.* Обратное движеніе силовыхъ линій произойдетъ при прекращеніи въ катушкѣ тока. Уничтоженіе тока въ проводникѣ отразится и на внѣшнемъ и на внутреннемъ пространствѣ; оно вызоветъ измѣненіе въ состояніи эфира въ окружающемъ пространствѣ, результатомъ чего послѣдуетъ то, что силовыя линіи съ обѣихъ сторонъ устремятся въ проволоку и поглотятся ею. Такимъ образомъ въ томъ и другомъ случаѣ окружающій катушку проводникъ будетъ *перерѣзываться* силовыми линіями, а слѣдовательно и въ этомъ случаѣ вполнѣ могутъ прилагаться разсужденіе Фарадэя и его формулировка закона индукціи.

Я обращаю вниманіе на разсмотрѣнный процессъ возникновенія силовыхъ линій. Мы видимъ, что *распространеніе силовыхъ линій въ пространствѣ происходитъ* въ нашемъ случаѣ не по на-

правленію ихъ, но *по направленію, перпендикулярному къ нимъ.* Такъ будетъ всегда, при всякомъ случаѣ возбужденія силовыхъ линій. Оно и не можетъ быть иначе. Вѣдь каждая силовая линія есть линія замкнутая. Точнѣе, магнитныя деформаціи въ средѣ образуются по замкнутымъ линіямъ. Онѣ уподобляются кольцевымъ волнамъ, хотя часто весьма сложной формы. Эти деформаціи сопровождаются натяженіемъ по направленію осей ихъ и давленіемъ въ направленіи перпендикулярномъ. Отсюда уже прямо вытекаетъ невозможность распространенія подобныхъ деформацій вдоль ихъ осей, ибо оси замкнуты, и, напротивъ, необходимость распространенія въ сторону, т. е. по направленію перпендикулярному къ осямъ. Мы имѣемъ подобное, только въ болѣе простой формѣ, въ теоріи Френеля распространенія свѣтовыхъ волнъ.

Благодаря теоретическимъ работамъ Максвелля и замѣчательнымъ опытамъ Гертца, подтвердившимъ на самомъ дѣлѣ выводы Максвелля, мы знаемъ, что это дѣйствительно происходитъ такъ. Знаемъ даже ту скорость, съ какою разбѣгаются магнитныя деформаціи въ различныхъ средахъ. Въ пустотѣ эта скорость близка къ 300.000 километровъ въ 1 секунду, т. е. равна скорости свѣта [1]).

Формулировка закона индукціи, данная Фарадэемъ, вполнѣ соотвѣтствуетъ дѣйствительному процессу, происходящему при этомъ въ полѣ вокругъ проводника. Индукція въ проводникѣ является только потому, что проводникъ попадаетъ въ потокъ распространенія силовыхъ линій. Интензивность распространяющагося потока и обусловливаетъ величину развивающейся электродвижущей силы. Въ этомъ собственно и заключается законъ Фарадэя. Формула Максвелля—слѣдствіе закона Фарадэя. Она стоитъ гораздо дальше отъ самаго явленія.

Всѣ случаи индукціи токовъ, на сколько ни были бы сложны условія, при которыхъ возникаетъ такая индукція, вполнѣ опре-

---

[1]) Скорость распространенія магнитныхъ деформацій: $v = \frac{1}{\sqrt{K\mu}}$.

Здѣсь K—діэлектрическая постоянная среда,
μ—магнитная проницаемость.

Обѣ величины должны соотвѣтствовать одной и той же системѣ единицъ: магнитной или электрической.

дѣляются примѣненіемъ той или другой формулы основнаго закона и не требуютъ ничего другого.

Перейду теперь къ механическимъ дѣйствіямъ магнитнаго поля на проводники, по которымъ проходятъ токи. Вообразимъ опять какое либо магнитное поле съ проведенными въ немъ, по указанному раньше правилу, силовыми линіями. Внесемъ въ это поле прямолинейный проводникъ съ токомъ. Проводникъ вслѣдствіе *тока, проходящаго по немъ*, долженъ быть окруженъ системою замкнутыхъ силовыхъ линій. При внесеніи такого проводника въ магнитное поле деформаціи послѣдняго должны претерпѣть измѣненія. Легко видѣть, что, вообще, если съ одной стороны проводника силовыя линіи, существовавшія раньше въ полѣ, и силовыя линіи, принадлежащія исключительно току въ проводникѣ, имѣютъ направленіе въ одну сторону, то съ другой стороны проводника будетъ какъ разъ обратное. Такимъ образомъ дѣйствіемъ тока въ проводникѣ усилятся деформаціи въ эфирѣ съ одной стороны проводника и ослабнутъ съ другой. Силовыя линіи будутъ кучнѣе расположены съ первой стороны и менѣе густо со второй. Боковое давленіе силовыхъ линій возрастетъ на первой сторонѣ и уменьшится на второй. Въ результатѣ будетъ перевѣсъ бокового давленія силовыхъ линій съ одной стороны проводника, а слѣдовательно и дѣйствіе поля на самый проводникъ. На рисункѣ 26 изображено однородное поле, въ которомъ силовыя линіи имѣютъ направленіе прямыхъ линій слѣва направо. Въ это поле вносится прямой проводникъ, имѣющій направленіе перпендикулярное плоскости чертежа съ токомъ, идущимъ изъ за плоскости чертежа впередъ. Силовыя линіи, *соотвѣтствующія такому току*, имѣютъ видъ концентрическихъ круговъ и направленіе, противоположное движенію часовой стрѣлки. Въ магнитномъ полѣ, *подъ* проводникомъ должно поэтому увеличиться напряженіе, т. е. линіи силъ здѣсь будутъ теперь тѣснѣе расположены, чѣмъ надъ проводникомъ. Слѣдствіемъ этого обнаружится *дѣйствіе на проводникъ* по направленію снизу вверхъ, т. е. *по направленію перпендикулярному къ плоскости, проведенной*

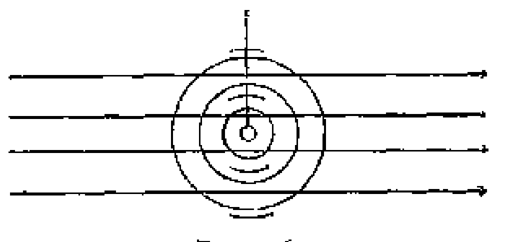


Рис. 26.

чрезъ проводникъ и силовыя линіи поля. Не трудно видѣть, что *такое дѣйствіе, испытываемое проводникомъ съ токомъ, будетъ увеличиваться вмѣстѣ съ увеличеніемъ напряженія поля и съ увеличеніемъ силы тока въ самомъ проводникѣ.*

Всякій проводникъ можно разбить на части и для каждой части повторить сейчасъ сказанное. Окончательное дѣйствіе поля на взятый проводникъ найдется комбинированіемъ дѣйствій на отдѣльныя его части [1]).

Магнитное поле не будетъ оказывать никакого дѣйствія на проводникъ съ токомъ, совпадающій съ направленіемъ силовыхъ линій. Въ самомъ дѣлѣ, въ этомъ случаѣ силовыя линіи тока и поля будутъ перпендикулярны другъ къ другу, а слѣдовательно не произойдетъ сложенія одной системы силовыхъ линій съ другой такъ, какъ это будетъ во всякомъ другомъ случаѣ, а потому и не явится перевѣса боковыхъ давленій съ какой нибудь стороны проводника.

Ознакомившись съ основнымъ закономъ индукціи токовъ и механическими дѣйствіями магнитнаго поля на проводники съ токами, мы въ состояніи уже безъ труда отдать себѣ отчетъ въ возбужденіи тока при посредствѣ динамомашинъ и въ совершеніи механической работы дѣйствіемъ тока. Представимъ себѣ под-

[1]) Дѣйствіе магнитнаго поля съ напряженіемъ H на элементъ проводника ds съ силою тока (въ абсолютныхъ единицахъ) i выражается чрезъ $Hi\sin\vartheta ds$. Здѣсь ϑ уголъ, составляемый направленіемъ тока въ элементѣ проводника съ направленіемъ силовыхъ линій поля. Это дѣйствіе направлено *влѣво* для наблюдателя, воображающаго себя плывущимъ по направленію тока съ лицомъ, обращеннымъ туда, куда направляются силовыя линіи поля.

Для замкнутаго проводника, не мѣняющаго своей величины и формы, т. е. опредѣляющагося по положенію въ пространствѣ тремя координатами (x, y, z) какой нибудь его точки и тремя углами (α, β, γ), составляемыми плоскостью, накрѣпко соединенной съ проводникомъ съ плоскостями координатъ, выводятся нижеслѣдующія выраженія для проекцій силъ X, Y, Z, по осямъ координатъ и для проекцій моментовъ вращенія ($\mathfrak{X}$, $\mathfrak{Y}$, $\mathfrak{Z}$) около осей:

$$X = \frac{dN}{dx},\ Y = \frac{dN}{dy},\ Z = \frac{dN}{dz}.$$

$$\mathfrak{X} = \frac{dN}{d\alpha},\ \mathfrak{Y} = \frac{dN}{d\beta},\ \mathfrak{Z} = \frac{dN}{d\gamma}.$$

Здѣсь N выражаетъ число силовыхъ линій, пронизывающихъ поверхность, ограниченную замкнутымъ проводникомъ, какъ контуромъ.

ковообразный магнитъ съ присоединенными къ концамъ его особыми желѣзными накладками, обращенными другъ къ другу вогнутыми цилиндрическими поверхностями. Помѣстимъ внутри между этими полюсными накладками полый цилиндръ или кольцо, приготовленные изъ желѣза (рис. 27). Магнитныя силовыя линіи направятся изъ конца магнита въ желѣзо цилиндра или кольца, а затѣмъ изъ этого желѣза въ другой конецъ магнита, и въ пространствѣ между желѣзомъ и полюсными поверхностями будутъ имѣть видъ почти параллельныхъ прямыхъ линій. На рис. 28 мы видимъ дѣйствительное распредѣленіе желѣзныхъ опилокъ въ такомъ пространствѣ. Нити, въ которыхъ располагаются опилки, почти прямыя и параллельныя другъ къ другу.

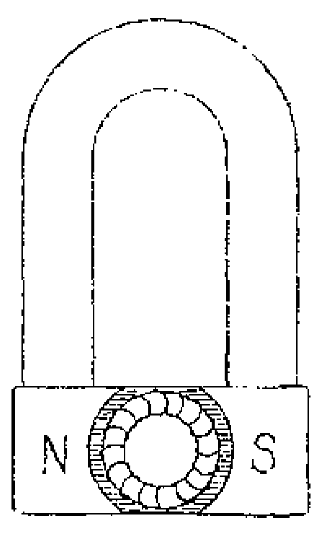
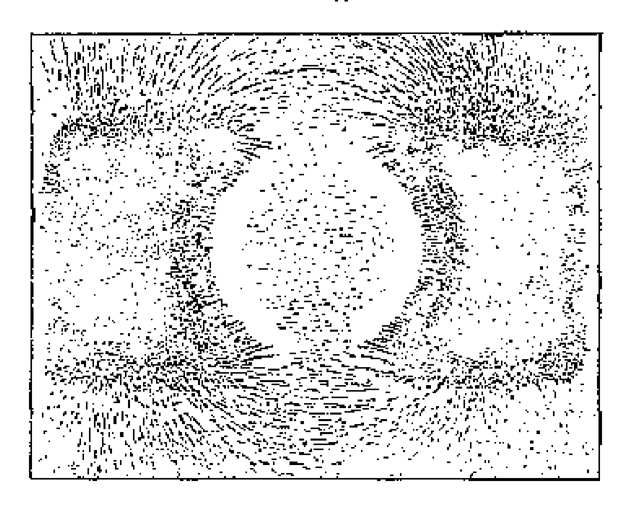


Рис. 27.

Приведемъ желѣзный цилиндръ во вращеніе около его оси. Легко видѣть, что *движеніе цилиндра не повліяетъ на распредѣленіе*


Рис. 28.

силовыхъ линій. При своемъ поворотѣ около оси цилиндръ во всякомъ положеніи будетъ одинаково относиться къ магнитному потоку, возбуждающемуся магнитомъ.

Обмотаемъ нашъ цилиндръ или наше кольцо мѣдною проволокою такъ, чтобы отдѣльные обороты не касались другъ

друга и были равномѣрно расположены вокругъ цилиндра или кольца. Оба конца проволоки такой *кольцевой* обмотки спаяемъ вмѣстѣ. Помѣстимъ окруженный проволокою цилиндръ или окруженное проволокою кольцо между полюсными поверхностями магнита и заставимъ двѣ мѣдныя пружинки или, лучше, двѣ мѣдныя щетки нажимать на проволоку обмотки въ мѣстахъ, лежащихъ въ экваторіальной плоскости магнитнаго поля (рис. 29). Если теперь приведемъ цилиндръ или кольцо во вращеніе, то въ каждомъ оборотѣ кольцевой обмотки *внѣшняя* часть, т. е., идущая по внѣшней поверхности цилиндра или кольца, станетъ перерѣзывать си-

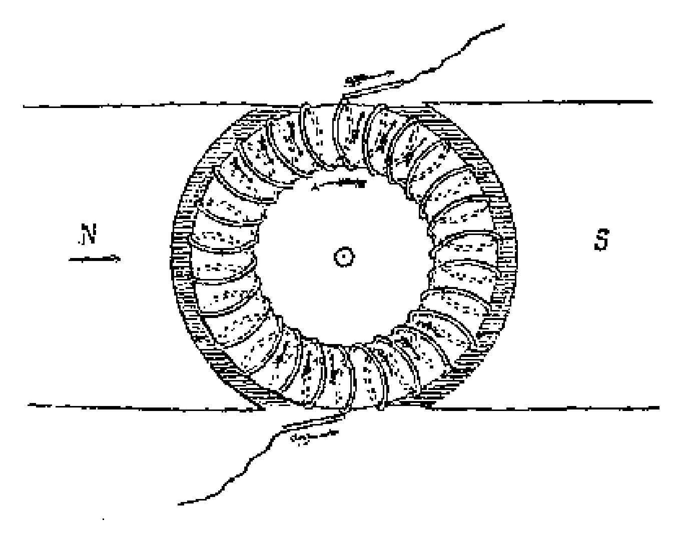


Рис. 29.

ловыя линіи, существующія между полюсными поверхностями и желѣзнымъ сердечникомъ обмотки, а слѣдовательно здѣсь въ каждомъ оборотѣ обмотки будетъ непрерывно возникать индукція тока. Вспомнивъ и примѣнивъ къ этому случаю законъ индукціи Фарадэя, мы легко придемъ къ заключенію, что *во всѣхъ оборотахъ каждой половины кольцевой обмотки, приходящейся между двумя щетками, во всякій моментъ индукція будетъ развивать токъ по одному направленію. Въ обѣихъ половинахъ кольца направленія являющихся индукціонныхъ токовъ будутъ прямо противоположны другъ другу.* Итакъ, въ той и другой половинѣ кольцевой обмотки, во время ея вращенія, электродвижущія силы индукціи, возникающія въ каждомъ оборотѣ, суммируются другъ съ другомъ и даютъ начало току въ проводникѣ, если послѣдній помѣстить между

щетками. Обѣ половины кольца посылаютъ токъ въ этотъ проводникъ по одному направленію. Въ мѣстѣ прикосновенія одной щетки къ кольцевой обмоткѣ происходитъ сліяніе токовъ, образующихся въ обѣихъ половинахъ ея, а въ мѣстѣ прикосновенія другой щетки происходитъ, напротивъ, раздѣленіе тока, вступающаго сюда чрезъ внѣшній проводникъ, на двѣ части. Обѣ половины кольцевой обмотки дѣйствуютъ по отношенію къ проводнику, введенному между щетками, какъ двѣ батареи одинаковаго числа гальваническихъ элементовъ, соединенныя *параллельно* другъ съ другомъ.

При томъ же проводникѣ между щетками, сила тока будетъ, на основаніи закона Фарадэя, увеличиваться съ увеличеніемъ скорости движенія цилиндра. Вѣдь при увеличеніи скорости вращенія цилиндра внѣшняя часть каждаго оборота кольцевой обмотки будетъ перерѣзывать въ единицу времени большее число силовыхъ линій. При одинаковомъ сопротивленіи *всей* цѣпи сила тока будетъ увеличиваться, при той же скорости вращенія, вмѣстѣ съ длиною внѣшнихъ частей каждаго оборота и вмѣстѣ съ числомъ оборотовъ обмотки цилиндра. Послѣднее потому, что электродвижущія силы, возникающія въ отдѣльныхъ оборотахъ обмотки слагаются. Само собою разумѣется, сила тока при одинаковыхъ прочихъ условіяхъ будетъ увеличиваться вмѣстѣ съ увеличеніемъ густоты силовыхъ линій въ пространствѣ между сердечникомъ кольца и полюсными поверхностями магнита, т. е. вмѣстѣ съ увеличеніемъ напряженія магнитнаго поля въ этомъ пространствѣ. Итакъ, *электродвижущая сила*, возникающая при вращеніи обмотаннаго кольцевою обмоткою желѣзнаго цилиндра или желѣзнаго кольца между полюсными поверхностями магнита и возбуждающая въ цѣпи между щетками токъ, *увеличивается вмѣстѣ съ числомъ оборотовъ цилиндра въ единицу времени, числомъ оборотовъ проволоки въ обмоткѣ, длиною цилиндра и величиною напряженія магнитнаго поля, возбуждаемаго магнитомъ.*

Мы познакомились съ такъ называемою магнито-электрическою машиною Грамма. Желѣзный цилиндръ, окруженный кольцевою обмоткою, представляетъ собою *кольцо Грамма*, впервые въ 1870 г. примѣненное послѣднимъ вмѣсто прежнихъ вращающихся катушекъ для возбужденія индукціоннаго тока отъ магнитовъ или электромагнитовъ. Собственно подобная кольцевая обмотка на

желѣзѣ была сдѣлана Пачинотти въ его маленькомъ электродвигателѣ еще въ 1865 г. Но изобрѣтеніе Пачинотти не имѣло практическаго характера и не обратило на себя особаго вниманія.

Устройство кольца Грамма оказало огромное вліяніе на усовершенствованіе машинъ, возбуждающихъ токъ. Всѣ прежнія машины давали токъ измѣнчивой силы, тогда какъ при употребленіи кольца Грамма получается токъ *почти* постоянный. Не трудно видѣть, въ чемъ заключается преимущество подобной обмотки. При большомъ числѣ оборотовъ проволоки, та и другая половины кольца между щетками во время вращенія этого кольца сохраняютъ *почти* неизмѣнное положеніе относительно силовыхъ линій, при этомъ происходитъ лишь непрерывная замѣна одного оборота другимъ (т. е. одинъ оборотъ занимаетъ мѣсто другого), чѣмъ и достигается *почти* полное постоянство величины электродвижущей силы въ теченіе цѣлаго оборота кольца.

Въ дѣйствительности кольцо Грамма устроено нѣсколько иначе, сложнѣе, чѣмъ я описалъ его. Щетки нажимаютъ не на самую проволоку обмотки, а на *коллекторъ*, представляющій собою металлическій полый цилиндръ, разрѣзанный параллельно оси на большое число частей, изолированныхъ другъ отъ друга, и помѣщенный на общую ось съ самимъ кольцомъ. Кольцевая обмотка

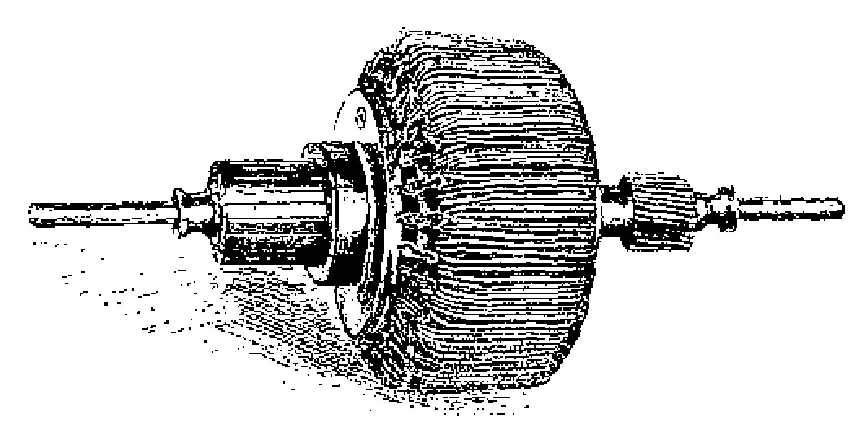


Рис. 30.

подраздѣляется на столько частей, сколько отдѣльныхъ пластинокъ въ коллекторѣ. Каждая пластинка коллектора соединяется металлически съ мѣстами подраздѣленій обмотки (рис. 30). Въ результатѣ, однако, будетъ то же, что и въ описанномъ, болѣе простомъ, кольцѣ. Положеніе щетокъ на коллекторѣ во время работы

машины въ дѣйствительности находится также не вполнѣ въ плоскости, перпендикулярной къ осевой линіи магнита. Причина этому — вліяніе развитія токовъ въ обмоткѣ кольца. Эти токи въ кольцѣ сами создаютъ магнитное поле, слагающееся съ полемъ магнита. Отсюда и происходитъ измѣненіе направленія силовыхъ линій, входящихъ въ сердечникъ кольца, а слѣдователь-

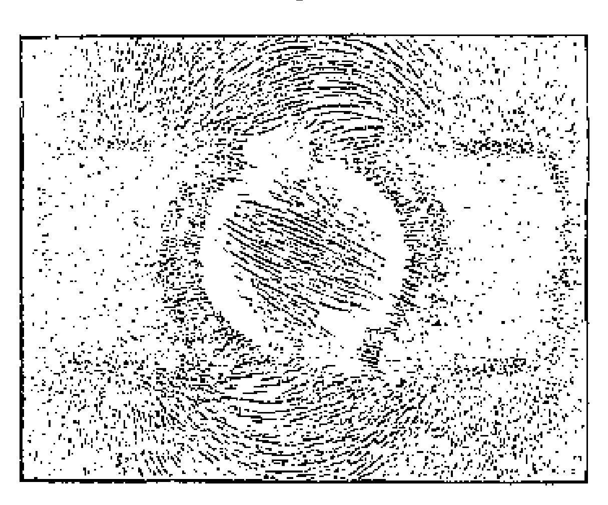


Рис. 31.

но и поворотъ на нѣкоторый уголъ экваторіальной плоскости магнитнаго поля. Рис. 31 показываетъ расположеніе желѣзныхъ опилокъ, когда по кольцу проходитъ токъ.

Я сказалъ, что, исходя изъ закона Фарадэя, мы можемъ заключить, что электродвижущая сила, развивающаяся въ кольцѣ Грамма, зависитъ отъ напряженія магнитнаго поля, въ которомъ происходитъ вращеніе этого кольца. При увеличеніи напряженія возрастаетъ и электродвижущая сила индукціи. Получить сильное магнитное поле, употребляя подковообразный магнитъ, довольно трудно. Мы знаемъ, что хорошіе стальные магниты очень дороги и во всякомъ случаѣ много слабѣе электромагнитовъ, такой же величины. Поэтому выгодно магнитъ въ машинѣ замѣнить электромагнитомъ. При этомъ, однако, остается, повидимому, затрудненіе въ способѣ возбужденія магнитнаго потока въ электромагнитѣ; представляется, что какъ будто нуженъ особый источникъ тока для этого. Въ нѣкоторыхъ очень большихъ машинахъ и употребляется до сихъ поръ такой особый источникъ тока для возбужденія магнитнаго поля. Но для обыкновенныхъ

машинъ особый возбудитель вообще излишенъ. Въ самомъ мягкомъ желѣзѣ послѣ намагничиванія остаются замѣтные слѣды магнетизма, но даже и безъ предварительнаго намагничиванія желѣзо вслѣдствіе дѣйствія земного магнетизма уже является съ признаками магнетизма. Вслѣдствіе этого между полюсными поверхностями электромагнита и сердечникомъ Граммовскаго кольца или вообще какой-либо иной формы *якоря* машины (*якоремъ* называется часть машины, въ которой возбуждается индукція) всегда существуетъ слабое магнитное поле. При приведеніи во вращеніе якоря въ такомъ полѣ въ немъ возбуждается индукція, т. е. получается нѣкоторая электродвижущая сила, хотя, конечно очень слабая.

Пусть одна щетка, нажимающая на коллекторъ якоря, напр., кольца Грамма, будетъ соединена съ началомъ обмотки электромагнита, другой конецъ которой и другая щетка коллектора пусть составляютъ собою два конца внѣшней цѣпи (рис. 32). Въ этомъ случаѣ явившійся въ началѣ слабый токъ пройдетъ чрезъ обмотку электромагнита и тѣмъ возбудитъ слабый магнитный потокъ въ его цѣпи. Возбужденный магнитный потокъ въ свою очередь усилитъ индукцію въ якорѣ машины, чрезъ что увеличится напряженіе магнитнаго поля въ машинѣ, а слѣдовательно снова произойдетъ усиленіе индукціи и т. д. Однимъ словомъ, при вращеніи якоря магнитный потокъ въ электромагнитѣ, сначала очень слабый, мало-по-малу станетъ усиливаться и чрезъ короткое сравнительно время достигнетъ нѣкоторой наибольшей силы. Машина такимъ образомъ будетъ возбуждать сама себя. Такія машины и носятъ названія *динамомашинъ* (*обыкновенныя динамо*).

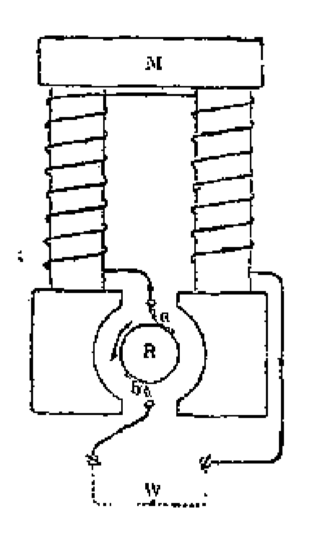


Рис. 32.

Возможно иное устройство динамомашинъ. Вмѣсто того, чтобы направлять въ обмотку элекромагнита весь токъ, развивающійся въ машинѣ, можно отдѣлить въ электромагнитъ только малую часть его. Съ этою цѣлью катушки электромагнита приготовляются изъ тонкой проволоки, но зато число оборотовъ этой проволоки въ нихъ берется большое. Концы такой обмотки

электромагнита соединяются со щетками коллектора, представляющими вмѣстѣ съ тѣмъ оконечности и внѣшней цѣпи (рис. 33). Подобныя динамомашины называются *динамо съ отвѣтвленнымъ возбужденіемъ* или *шунтъ-динамо* (shunt-dynamo).

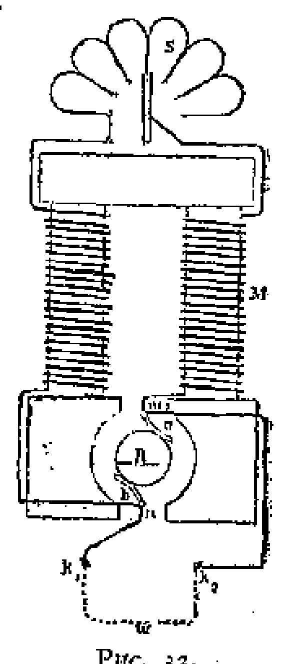


Рис. 33.

Для практики такія динамо особенно удобны. Съ увеличеніемъ сопротивленія внѣшней цѣпи сила тока въ цѣпи должна уменьшаться и въ *обыкновенной* динамо будетъ уменьшаться вслѣдствіе этого сила магнитнаго потока, а слѣдовательно и электродвижущая сила, возникающая въ якорѣ. Итакъ, всякое измѣненіе во внѣшней цѣпи будетъ замѣтно отражаться въ дѣйствіи машины. Въ *динамо съ отвѣтвленнымъ возбужденіемъ*, при увеличеніи сопротивленія внѣшней цѣпи, токъ, отвѣтвляющійся въ электромагнитъ, увеличится въ своей силѣ, что вызоветъ усиленіе магнитнаго потока, а слѣдовательно и увеличеніе электродвижущей силы въ якорѣ. Въ этомъ случаѣ дѣйствіе машины не будетъ ослабляться такъ, какъ въ обыкновенной.

Я не стану входить въ дальнѣйшее разсмотрѣніе достоинствъ *шунтъ-динамо*, равно какъ и еще третьяго типа машинъ, такъ называемыхъ *компаундъ-динамо* (compound-dynamo), не буду и описывать детально устройства столь разнообразныхъ въ настоящее время динамомашинъ,

Ограничусь лишь представленіемъ рисунковъ двухъ динамомашинъ: старой машины Грамма (рис. 34) и другой, одной изъ лучшихъ въ настоящее время, *«динамо типа Манчестеръ»* (Рис. 35). Сказанное мною раньше вполнѣ достаточно для того, чтобы прослѣдить дѣйствіе какой угодно машины, дающей токъ *постояннаго направленія* [1]).

---

[1]) Величина электродвижущей силы (E), развивающейся въ якорѣ динамо, выражается въ абсолютныхъ единицахъ формулою $E = nNZ$, здѣсь n—число оборотовъ якоря въ 1 сек., N—число проволокъ, сосчитанныхъ на его внѣшней поверхности, Z — полное число силовыхъ линій, пронизывающихъ желѣзо якоря. Выраженная въ вольтахъ электродвижущая сила представится формулою:

$$e = nNZ \cdot 10^{-8}$$

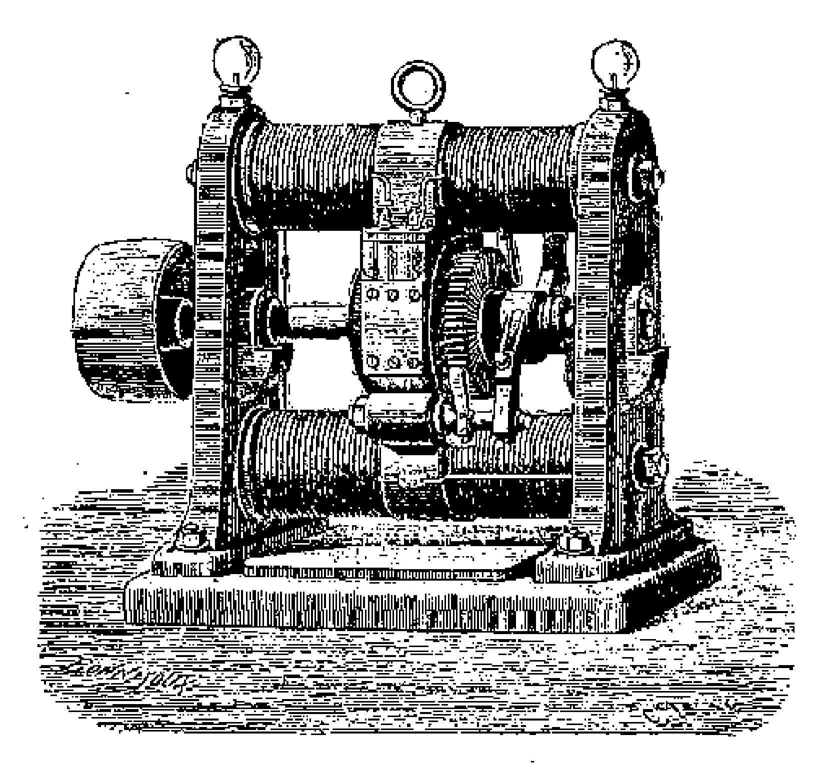


Рис. 34.

Если не присоединять къ кольцу Грамма коллектора, а два мѣста его кольцевой обмотки *A* и *B* (рис. 36), *лежащія на одномъ*

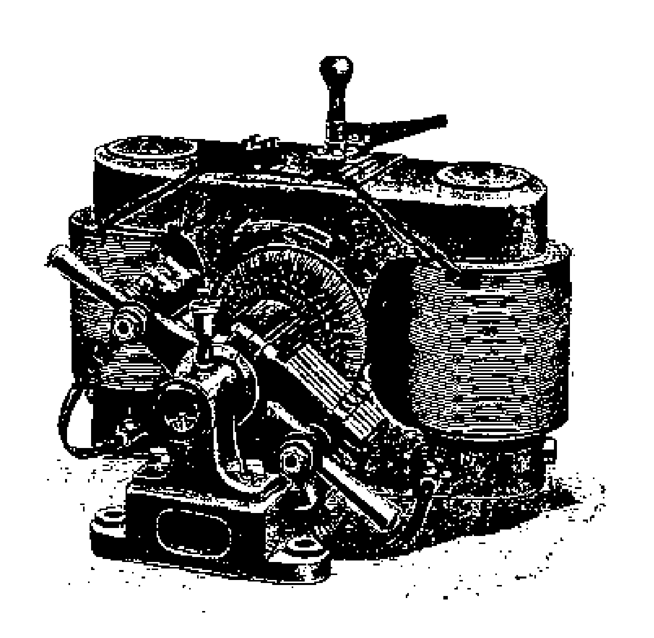


Рис. 35.

діаметръ, соединить проволоками съ двумя сплошными, изолированными другъ отъ друга, металлическими кольцами a и b, по-

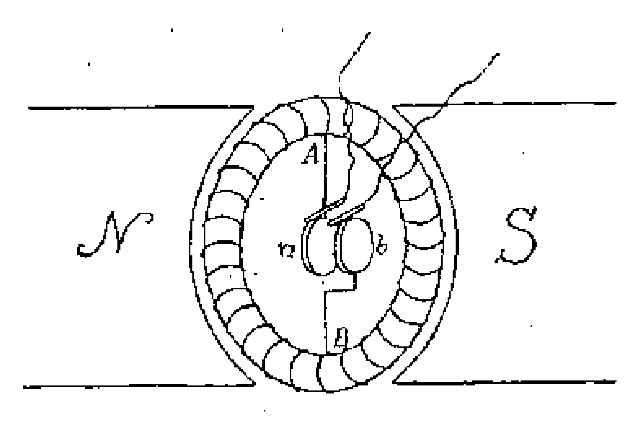


Рис. 36.

мѣщенными на оси, и нажать на эти кольца металлическія щетки, то, при возбужденіи электромагнита постороннимъ токомъ, въ проводникѣ между щетками при вращеніи кольца получится *токъ перемѣнный*. Въ теченіе перваго полуоборота кольца съ момента, когда кольцо занимаетъ положеніе, при которомъ діаметръ AB параллеленъ силовымъ линіямъ, сила тока во внѣшнемъ проводникѣ будетъ сначала увеличиваться, потомъ достигнетъ наибольшей величины и затѣмъ, когда діаметръ AB снова приметъ направленіе силовыхъ линій, сила тока обратится въ нуль. При дальнѣйшемъ вращеніи кольца, т. е. во время

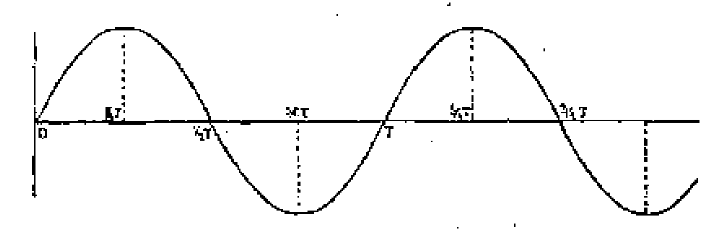


Рис. 37.

второго полуоборота, повторится то же самое, лишь направленіе тока во внѣшнемъ проводникѣ будетъ *прямо противоположное*. Такимъ образомъ, при вращеніи кольцевой обмотки токъ будетъ мѣняться какъ по величинѣ, такъ и по направленію. Если мы графически представимъ измѣненіе тока со временемъ, для

чего на горизонтальной прямой будемъ откладывать времена, а перпендикулярами къ этой прямой изобразимъ соотвѣтствующія силы тока, то мы получимъ кривую, весьма близко, какъ показываетъ опытъ, совпадающую съ кривою, называемою *синусоидой* (рис. 37).

Все, что сейчасъ сказано, легко можетъ быть выведено на основаніи закона индукціи Фарадэя.

На самомъ дѣлѣ машины, возбуждающія токъ перемѣннаго направленія, устраиваются иначе. Я не буду входить въ описаніе подобныхъ машинъ, въ слѣдующей своей лекціи я познакомлю съ одною такою машиною, работавшею осенью 1891 г. въ Лауфенѣ на Неккарѣ и дававшею токъ для передачи работы Лауфенскаго водопада во Франкфуртъ, на разстояніе 175 километровъ. Я остановлюсь теперь на разсмотрѣніи особенности тока этихъ машинъ, благодаря которой онѣ получили большое распространеніе.

Мы знаемъ, что сила тока въ какой-либо цѣпи при данномъ электровозбудителѣ, т. е. при данной величинѣ электродвижущей силы, зависитъ отъ сопротивленія цѣпи. Сопротивленіе же всякаго проводника увеличивается съ его длиною и уменьшается съ увеличеніемъ поперечнаго сѣченія. Имѣя батарею изъ гальваническихъ элементовъ (или аккумуляторовъ) или динамомашину, дающую токъ постояннаго направленія и развивающую въ своемъ якорѣ электродвижущую силу, величина которой заключается при разныхъ условіяхъ между извѣстными предѣлами, мы не можемъ значительно увеличить сопротивленіе цѣпи, не произведя при этомъ значительнаго ослабленія силы тока. Такимъ образомъ, при передачѣ тока на большое разстояніе, если только развиваемая въ батареѣ или динамомашинѣ электродвижущая сила не очень велика, мы должны употреблять толстые проводники, что представляется въ большинствѣ случаевъ вполнѣ невозможнымъ въ виду громадной стоимости такихъ проводниковъ и большого затрудненія въ способѣ ихъ прокладки. Значительное увеличеніе электродвижущей силы динамомашины, дающей токъ постояннаго направленія, требуетъ особыхъ предосторожностей въ устройствѣ коллектора, особой тщательной изоляціи въ немъ. Но и при достиженіи въ машинѣ большой электродвижущей силы не будетъ много пользы, если въ цѣпи токъ

значительной силы. Въ самомъ дѣлѣ, въ проволокахъ, ведущихъ этотъ токъ на большое разстояніе, будетъ отдѣляться слишкомъ много безполезнаго или даже вреднаго тепла, которое, конечно, будетъ образовываться на счетъ затраты энергіи при полученіи электродвижущей силы въ электровозбудителѣ. Эксплоатація тока при такихъ условіяхъ будетъ крайне невыгодна. Все это невольно должно въ значительной степени ограничивать разстоянія, на которыхъ, повидимому, можно пользоваться динамомашинами. Я говорю «*повидимому*», такъ какъ на самомъ дѣлѣ представляется возможность посылать слабый токъ на большія разстоянія по сравнительно тонкимъ проводникамъ и уже на мѣстѣ пользованія переводить при посредствѣ особыхъ приспособленій токъ малой силы въ токъ желаемый.

При употребленіи токовъ постояннаго направленія это достигается слѣдующимъ образомъ. Для возбужденія тока употребляютъ динамомашину съ большею электродвижущею силою, какъ говорятъ, — динамо «*высокаго напряженія*». Отъ этой машины по проволокамъ, не много превышающимъ по толщинѣ проволоки телеграфныя, посылаютъ токъ въ мѣсто назначенія. Здѣсь слабый сравнительно токъ вступаетъ въ динамомашину, подобную первой, и вызываетъ въ ней движеніе якоря, какъ объ этомъ будетъ сообщено въ слѣдующей лекціи, т. е. обращаетъ эту динамо въ двигатель. На одной оси съ якоремъ этой динамо находится якорь другой динамо, развивающей при вращеніи ея якоря желаемую электродвижущую силу, т. е. дающую въ цѣпи тотъ токъ, который требуется. Такая комбинація двухъ динамо, одной, служащей двигателемъ, другой — электровозбудителемъ, носитъ названіе „*трансформатора для токовъ постояннаго направленія*“.

Много проще подобная трансформація производится въ случаѣ токовъ перемѣннаго направленія. Явленіе индукціи, вызываемое измѣняющимся магнитнымъ потокомъ, составляетъ основаніе такой трансформаціи. Мы давно, съ 1848 г., пользуемся приборомъ, при помощи котораго превращаемъ одинъ токъ въ другой, отличный отъ перваго по свойствамъ. Приборъ этотъ всѣмъ извѣстенъ. Это — катушка Румкорфа.

Заставляя прерываться токъ, идущій по первичной, толстой обмоткѣ катушки Румкорфа и возбуждаемый батареей изъ нѣсколькихъ элементовъ, мы попеременно создаемъ и уничтожаемъ

магнитный потокъ въ желѣзномъ сердечникѣ катушки. Въ каждомъ оборотѣ вторичной обмотки, какъ видѣли мы въ настоящую лекцію, должна являться при этомъ электродвижущая сила, по направленію то въ одну, то въ другую сторону (Формулировка закона индукціи, данная Максвеллемъ, особенно удобна въ этомъ случаѣ). Вторичная обмотка дѣлается изъ большаго числа оборотовъ, но зато и проволока для нея берется тонкая. Во всѣхъ отдѣльныхъ оборотахъ возникающая электродвижущая сила во всякій моментъ времени почти одинакова, ибо силовой потокъ лишь вблизи концевъ сердечника расходится въ стороны. Такимъ образомъ *полная электродвижущая сила во вторичной обмоткѣ весьма близко пропорціональна числу ея оборотовъ,* а потому въ большихъ катушкахъ при употребленіи первичнаго тока отъ нѣсколькихъ элементовъ она можетъ быть очень значительная. Сила вторичнаго (индукціоннаго) тока, однако, будетъ малая даже при соединеніи концовъ вторичной обмотки короткимъ и толстымъ проводникомъ, малая потому, что сопротивленіе этой обмотки велико, да къ тому же возникновеніе индукціоннаго тока въ этой обмоткѣ осложняется особымъ явленіемъ *самоиндукціи* [1]), еще болѣе ослабляющимъ токъ. Большая величина развивающейся электродвижущей силы по вторичной обмоткѣ катушки Румкорфа даетъ возможность полученія такихъ электрическихъ явленій, которыя вызываются обыкновенно при посредствѣ электрическихъ машинъ. Въ послѣднихъ, какъ и въ Румкорфовой катушкѣ, является громадная электродвижущая сила.

[1]) Усиленіе или ослабленіе тока въ какомъ-либо проводникѣ сопровождается соотвѣтствующимъ измѣненіемъ магнитнаго потока, создаваемаго *самымъ этимъ* токомъ. Измѣненіе же магнитнаго потока отражается обратно на проводникѣ, и вызываетъ въ немъ электродвижущую силу индукціи. Легко прослѣдить, что всякое усиленіе тока въ проводникѣ произведетъ появленіе въ немъ электродвижущей силы, которая сама по себѣ должна была бы возбудить токъ, обратнаго направленія току усиливающемуся. Этотъ послѣдній токъ будетъ поэтому замедляться въ своемъ измѣненіи и при частыхъ появленіяхъ и исчезновеніяхъ въ проводникѣ не въ состояніи будетъ достигать до той силы, какую онъ могъ бы получить, если бы не было этой индукціи. Такая индукція, вызываемая самимъ же токомъ въ проводникѣ, или *самоиндукція* въ проводникѣ, играетъ роль тормаза для тока; она кажущимся образомъ увеличиваетъ сопротивленіе проводника.

Здѣсь предъ нами большая катушка Румкорфа и батарея изъ 5 аккумуляторовъ. Я соединяю съ этою батареей калильную лампу. Вы видите, уголекъ сильно накаливается, лампа ярко свѣтитъ. Я отдѣляю лампу отъ проводниковъ, соединенныхъ съ полюсами батареи, и приближаю ихъ концы другъ къ другу. Какъ бы сильно ни были сближены эти концы, между ними не появляются искры. Я соединяю теперь эту батарею съ первичною обмоткою Румкорфовой катушки, а лампочку ввожу въ цѣпь вторичной. Катушка работаетъ, но въ лампѣ ни малѣйшаго слѣда накаливанія угля. Итакъ токъ во вторичной цѣпи слишкомъ слабъ, чтобы быть въ состояніи накалить уголь. Нужны даже особыя средства для обнаруженія происходящаго при этомъ нагрѣваніи угля. На столько оно не значительно. Я размыкаю теперь первичную цѣпь, удаляю лампу изъ вторичной цѣпи и соединяю концы вторичной обмотки съ мѣдными шариками. Шарики отстоятъ другъ отъ друга на 1 см. и, несмотря на это, какъ только мы пускаемъ въ катушку токъ, мы наблюдаемъ непрерывный рядъ искръ между шариками. Я могу соединить съ Румкорфовой катушкой Лейденскую банку и эта послѣдняя будетъ заряжаться. Однимъ словомъ, какъ уже сказано, съ этою катушкою можно произвести рядъ электрическихъ опытовъ, такихъ же, какіе мы получаемъ и съ обыкновенною электрическою машиною. Я соединяю оконечности вторичной обмотки проволокой и заставляю дѣйствовать катушку. Мы знаемъ, что всѣ явленія въ проволокѣ, которыя зависятъ отъ *силы* тока будутъ при этомъ весьма слабы. Я приближаю теперь къ проволокѣ руку и, когда рука находится еще на нѣкоторомъ разстояніи отъ проволоки, получаю въ руку чувствительный ударъ съ появляющеюся при этомъ искрой. Итакъ, проволока проводитъ слабый по силѣ токъ, но уподобляется довольно сильно наэлектризованному тѣлу. Такой токъ, малой силы, но вызываемый большою электродвижущею силою, называютъ *токомъ большого напряженія*. Подобный токъ можно сравнить съ горнымъ ручьемъ, въ которомъ бѣжитъ немного воды, но который, благодаря большой скорости теченія воды, въ состояніи произвести цѣлый рядъ разрушеній. Еще ближе будетъ сравненіе такого тока съ узкою водопроводной трубкой, по которой посылается вода подъ большимъ напоромъ. Итакъ, *Румкорфова катушка преобразуетъ токъ, значительный по силѣ,*

но малаго напряженія, въ токъ малой силы, но большого напряженія. Такимъ образомъ Румкорфова катушка представляетъ изъ себя *трансформаторъ тока.*

Возьмемъ другую катушку Румкорфа такой же величины, какъ первая. При посредствѣ тонкихъ и длинныхъ проволокъ соединимъ вторичную обмотку первой катушки со вторичною обмоткою второй катушки, а съ концами первичной обмотки послѣдней соединимъ только что употреблявшуюся калильную лампочку. Приведемъ въ дѣйствіе прерыватель, помѣщенный въ первичную цѣпь первой катушки. Мы видимъ, что лампочка теперь свѣтитъ, свѣтитъ нѣсколько только слабѣе, чѣмъ непосредственно соединенная съ аккумуляторами. Такимъ образомъ, вторая катушка Румкорфа является вторымъ *трансформаторомъ. Она преобразуетъ вступающій въ ея тонкую обмотку слабый, но высокаго напряженія токъ, въ токъ, развивающійся путемъ индукціи въ ея толстой обмоткѣ, сравнительно сильный, но малаго напряженія.*

Не трудно отдать отчетъ въ происходящемъ явленіи. Въ желѣзномъ сердечникѣ второй Румкорфовой катушки возбуждается и исчезаетъ магнитный потокъ, перемѣннаго направленія, вслѣдствіе прохожденія перемѣннаго тока по тонкой обмоткѣ этой катушки. Число силовыхъ линій, пронизывающихъ этотъ сердечникъ, большое, хотя возбуждающій ихъ токъ и малой силы. Въ самомъ дѣлѣ мы знаемъ, что являющійся при такихъ условіяхъ *магнитный потокъ пропорціоналенъ произведенію силы тока на число оборотовъ катушки,* которая возбуждаетъ этотъ потокъ, а здѣсь, въ тонкой обмоткѣ, число оборотовъ проволоки очень большое. Возбуждающійся и исчезающій, перемѣннаго направленія, магнитный потокъ въ сердечникѣ производитъ индукцію въ оборотахъ толстой обмотки и, вслѣдствіе небольшаго числа послѣднихъ, возбуждаетъ небольшую электродвижущую силу. Но и сопротивленіе цѣпи первичной толстой обмотки не велико, потому токъ, являющійся въ этой цѣпи, достигаетъ много большей силы, чѣмъ токъ, проходящій по тонкимъ обмоткамъ. Итакъ, при посредствѣ двухъ Румкорфовыхъ катушекъ представляется возможнымъ при помощи *тонкихъ* проводниковъ передавать токъ отъ батареи на большое разстояніе, обращая его предварительно въ перемѣнный. Сопротивленіе соединительныхъ проводниковъ и сопротивленіе

тонкой обмотки второй катушки хотя и ослабляютъ токъ, возникающій вслѣдствіе появленія электродвижущей силы индукціи въ первой катушкѣ, но вслѣдствіе большой величины этой электродвижущей силы и при большомъ сопротивленіи всей цѣпи произведеніе числа оборотовъ тонкой обмотки второй катушки на силу проходящаго по ней тока можетъ имѣть чувствительную величину.

На сколько мнѣ извѣстно, первый П. Н. Яблочковъ въ 1878 г. пытался примѣнить для практическихъ цѣлей Румкорфовы катушки, какъ трансформаторы тока. Но лишь въ 1883 г. удалось въ дѣйствительности употребить съ пользою этотъ пріемъ для передачи электрическаго тока на разстояніе. Въ этомъ году выданъ Жибсу и Голлару патентъ на *«трансформаторъ»*. Черезъ два года, въ 1885 г., былъ устроенъ трансформаторъ Циперновскаго, получившій особенно большое распространеніе въ системѣ канализаціи электрическаго перемѣннаго тока фирмы Ганца въ Будапештѣ.

Всевозможные трансформаторы, имѣющіеся нынѣ, представляютъ собою двѣ обмотки проволоки, той или другой формы. Въ одной обмоткѣ число оборотовъ большое и сама проволока сравнительно тонкая. Въ другой обмоткѣ, обратно, число оборотовъ не велико, но проволока толстая. Обѣ эти обмотки окружаютъ сердечникъ изъ желѣза, обыкновенный или проволочный, или составленный изъ полосъ, или же сами окружены желѣзомъ, причемъ желѣзо обхватываетъ обороты обѣихъ обмотокъ со всѣхъ сторонъ. Схематически всякій трансформаторъ можно представить тремя сцѣпленными другъ съ другомъ звеньями цѣпи. Одно звено — *тонкая* обмотка, такъ называемая *первичная* обмотка трансформатора. Эта первичная обмотка служитъ проводникомъ для слабаго, но большаго напряженія, перемѣннаго тока. Второе звено трансформатора — замкнутый перемѣнный магнитный потокъ, возбуждающійся вокругъ первичной обмотки. Въ однихъ трансформаторахъ, наприм., въ трансформаторѣ Циперновскаго, этотъ магнитный потокъ на всемъ своемъ пути развивается въ желѣзѣ, въ другихъ, напр., въ трансформаторѣ А. И. Полешко, онъ частію пронизываетъ воздухъ. Третье звено трансформатора, — вторичная его обмотка приготовленная изъ толстой проволоки и обхватываемая вокругъ своихъ оборотовъ перемѣннымъ магнитнымъ потокомъ, является мѣстомъ возбужденія электродвижущей силы индукціи

небольшой величины, но, вслѣдствіе небольшаго сопротивленія этой обмотки, могущей въ ея цѣпи давать сильный токъ. На рис. 38 изображенъ трансформаторъ Циперновскаго. Желѣзный

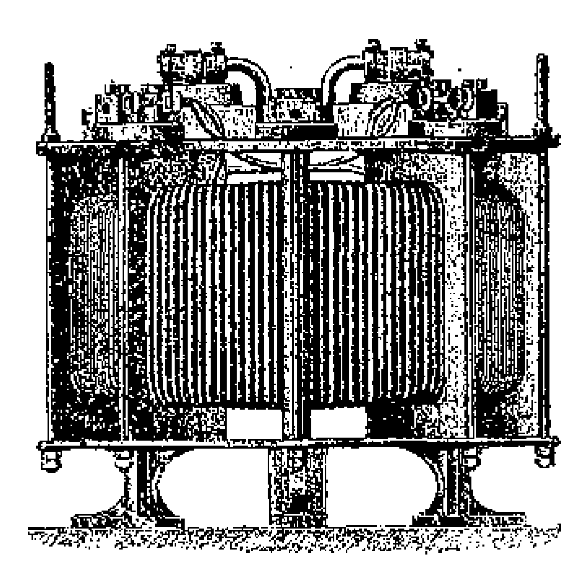


Рис. 38.

цилиндръ, составленный изъ желѣзныхъ, отдѣленныхъ другъ отъ друга не проводящимъ веществомъ, кольцевыхъ дисковъ, окруженъ двумя кольцевыми обмотками изъ тонкой и толстой проволоки.

Теперь легко понять употребленіе и значеніе трансформаторовъ. Въ мѣстѣ, удобномъ для полученія движущей силы, ставится динамомашина, дающая перемѣнный токъ *большого* напряженія, т. е. развивающая въ своемъ якорѣ большую электродвижущую силу. Отъ этой машины по сравнительно *тонкимъ* проводамъ перемѣнный токъ распространяется до мѣстъ его потребленія. Въ каждомъ такомъ отдѣльномъ мѣстѣ этотъ токъ проходитъ чрезъ *первичную* обмотку помѣщеннаго тутъ трансформатора и во *вторичной* обмоткѣ послѣдняго возбуждаетъ *требуемую*, смотря по условіямъ потребленія тока, *электродвижущую силу*, вызывающую въ цѣпи также перемѣнный токъ, но вполнѣ достаточный по силѣ для произведенія того, чтò отъ него требуется. Сравнительно тонкіе проводники стóятъ не дорого; слѣдовательно на устройство канализаціи тока потребуется не чрезмѣрно большой капиталъ, а съ другой стороны эти проводники, вслѣдствіе малой силы тока въ нихъ, нагрѣваются немного,

т. е. безполезная теплота, развивающаяся въ нихъ на счетъ работы, приводящей въ дѣйствіе динамомашину, будетъ не велика по количеству и не много увеличитъ стоимость эксплоатаціи.

Благодаря такой системѣ трансформаціи тока и возможно было безъ большихъ затратъ произвести во время Франкфуртской электрической выставки, осенью 1891 г., передачу значительнаго тока на разстояніе 175 километровъ по мѣднымъ проволокамъ, діаметромъ всего въ 4 мм. Въ Лауфенѣ на Неккарѣ силою воды приводилась въ дѣйствіе динамомашина, во Франкфуртѣ на Майнѣ послѣ трансформаціи получался токъ, достаточный для накаливанія 1000 лампочекъ и одновременно съ этимъ для приведенія во вращеніе якоря двигателя, дѣйствовавшаго на водяной насосъ и потреблявшаго работу въ 100 лошадиныхъ силъ. Такимъ образомъ, работа въ 200 лошадиныхъ силъ получалась во Франкфуртѣ при помощи приходящаго сюда электрическаго тока и эта работа, какъ показали изслѣдованія экспертной комиссіи, составляла 72% той работы, какая могла бы быть получена непосредственно въ Лауфенѣ отъ находившейся тамъ динамо. Такимъ образомъ, всего только 28% работы терялось при передачѣ тока на 175 километровъ.

Интересно сопоставить стоимость проволокъ, въ дѣйствительности употребленныхъ между Лауфеномъ и Франкфуртомъ при пользованіи трансформаторами, со стоимостью проводовъ, какіе надо было бы проложить на всемъ протяженіи, если бы въ Лауфенѣ динамомашина имѣла электродвижущую силу, равную той, какая получалась во Франкфуртѣ во вторичной цѣпи трансформаторовъ, и если бы токъ изъ этой машины непосредственно направлялся во Франкфуртъ и тамъ долженъ былъ бы имѣть ту же силу, какую онъ имѣлъ въ дѣйствительности. Въ этомъ случаѣ, какъ показываетъ расчетъ, провода должны были бы представлять цилиндръ діаметромъ въ 1400 мм.; общая стоимость ихъ между Лауфеномъ и Франкфуртомъ была бы въ 7200 милліоновъ марокъ. На самомъ дѣлѣ, какъ уже сказано, провода представляли собою мѣдныя проволоки, діаметромъ въ 4 мм., и стоили всего 97000 марокъ. Этихъ цифръ достаточно, чтобы видѣть какое огромное экономическое значеніе имѣетъ система трансформаціи тока. Послѣднее же несравненно легче осуществляется при пользованіи перемѣннымъ токомъ, чѣмъ при употребленіи

токовъ, постояннаго направленія, для которыхъ трансформаторы, какъ мы видѣли, должны быть много сложнѣе, а слѣдовательно и много дороже. Это и представляетъ собою причину большого распространенія машинъ перемѣннаго тока, т. е. такъ называемыхъ альтернаторовъ, на практикѣ.

Лекція 5-я.

Перехожу къ своей послѣдней задачѣ — выясненію основъ примѣненія электрическаго тока къ произведенію работы. Настоящій вопросъ является наиболѣе существеннымъ въ электротехникѣ. Какъ ни красиво и пріятно для глазъ электрическое освѣщеніе, оно во всякомъ случаѣ роскошь безъ которой обойтись можно. Ни театральные эфекты, ни блескъ магазиновъ или городскихъ улицъ ночью — должно быть главною задачею электротехники! Электротехника можетъ дать иное, болѣе важное, болѣе полезное. Облегчить трудъ мастера, доставить ему *дешевую* рабочую силу, во многихъ мѣстахъ насчетъ даровыхъ явленій природы,— вотъ цѣль, вполнѣ достижимая при помощи электрическаго тока и крайне желательная, ибо съ этимъ въ значительной степени связана возможность улучшенія экономическаго положенія не малой части трудящагося населенія! Мы наканунѣ рѣшенія такой важной задачи. Главное уже сдѣлано; предстоитъ лишь упорядоченіе въ самой организаціи дѣла. Намъ русскимъ должно быть отрадно, что въ этомъ вопросѣ электротехники имя нашего соотечественника играетъ не малую роль. Г. Доливо-Добровольскому принадлежитъ честь практическаго осуществленія идеи новаго устройства электродвигателей, представляющей собою огромныя преимущества. Его имя тѣсно связано съ блестящимъ успѣхомъ первой передачи рабочей силы на разстояніе 175 километровъ.

Достигнуть непрерывнаго вращенія маховаго колеса и при посредствѣ этого вращенія производить работу возможно съ помощью любой динамомашины. *Всякая динамо можетъ быть обращена въ двигатель.*

Пропуская электрическій токъ, доставляемый какимъ-нибудь электровозбудителемъ, черезъ динамомашину, мы получимъ вращеніе якоря этой динамо. Вращеніе якоря будетъ являться ре-

зультатомъ дѣйствія магнитнаго поля, возникающаго между полюсами динамомашины, на токъ, проходящій по обмоткѣ якоря. Въ самомъ дѣлѣ, въ *«обыкновенной»* динамомашинѣ весь токъ, впущенный чрезъ конечные зажимы ея, проходитъ по обмоткѣ электромагнита и тѣмъ образуетъ магнитный потокъ внутри стержней электромагнита и сердечника якоря; между полюсными поверхностями электромагнита и желѣзнаго якоря возбуждается, слѣдовательно, магнитное поле, напряженіе котораго будетъ зависѣть отъ силы тока, и силовыя линіи въ этомъ полѣ получаютъ направленіе, подобное тому, какое имѣютъ, когда данная динамо употребляется какъ возбудитель тока. Въ динамо *«съ отвѣтвленнымъ возбужденіемъ»* (*шунтъ-динамо*) тоже самое производится токомъ, отвѣтвляющимся отъ главнаго тока въ обмотку электромагнита. Магнитный потокъ въ электромагнитѣ и якорѣ и въ этихъ машинахъ можетъ достигнуть большой силы, несмотря на то, что токъ отвѣтвляется слабый, такъ какъ число оборотовъ въ катушкахъ электромагнита такихъ машинъ очень большое. Бо́льшая часть тока въ этихъ машинахъ и весь токъ въ «обыкновенныхъ», вступая черезъ щетки въ якорь, раздѣляется въ обмоткѣ послѣдняго на двѣ равныя части и, какъ легко видѣть, обтекаетъ обѣ половины сердечника между мѣстами прикосновенія щетокъ *въ противоположныхъ* направленіяхъ. Такимъ образомъ, если смотрѣть на якорь по направленію силовыхъ линій въ междуполюсномъ пространствѣ, то направленіе тока во *внѣшнихъ* частяхъ оборотовъ проволоки послѣдняго, пересѣкаемыхъ силовыми линіями (при вступленіи ихъ въ сердечникъ якоря и выходѣ изъ него), представится обратнымъ для той и другой половинъ обмотки. Итакъ, *магнитное поле будетъ стремиться двигать въ противоположныхъ направленіяхъ наружныя части оборотовъ обмотки обѣихъ половинъ якоря, т. е. будетъ производить вращеніе якоря въ обѣихъ его частяхъ въ одну сторону.* Дѣйствіе, испытываемое якоремъ, а также и та работа, какую онъ въ состояніи совершить, вполнѣ опредѣляются напряженіемъ возникающаго магнитнаго поля и силою тока, проходящаго по якорю [1]). Въ «обыкновенныхъ» динамо,

[1]) Величина *полной* работы, совершаемой электродвигателемъ въ единицу времени, выражается чрезъ $R = ie$. Здѣсь i — сила тока въ якорѣ двигателя, а

употребляемыхъ какъ двигатели при помощи тока другого электровозбудителя, *это дѣйствіе на якорь будетъ наибольшее, пока якорь въ покоѣ. Оно уменьшается вмѣстѣ съ увеличеніемъ скорости вращенія якоря.* Причина такого уменьшенія дѣйствія магнитнаго поля на якорь машины при возрастаніи скорости вращенія его заключается въ ослабленіи силы тока, вслѣдствіе увеличенія при этомъ явленія индукціи въ обмоткѣ якоря, индукціи, которая вызывается въ движущемся якорѣ магнитнымъ полемъ машины и стремится возбудить въ обмоткѣ якоря токъ по направленію, обратному току существующему. Подобное свойство такихъ двигателей, устроенныхъ какъ «обыкновенныя» динамо представляется крайне важнымъ и удобнымъ во многихъ случаяхъ. Напр., такіе двигатели являются весьма удобными для движенія вагоновъ трамваевъ. Въ самомъ дѣлѣ, для того, чтобы сдвинуть съ мѣста вагонъ, приходится употреблять большее усиліе, чѣмъ это нужно для поддержанія движенія вагона. Въ виду этого электродвигатель, устроенный какъ «обыкновенная динамо», и представляется вполнѣ соотвѣтствующимъ въ этомъ случаѣ. *При употребленіи динамо «съ отвѣтвленнымъ возбужденіемъ» въ качествѣ двигателей дѣйствіе на якорь не столь значительно отличается при покоѣ якоря и при движеніи его.* Въ этихъ машинахъ при увеличеніи скорости якоря и при уменьшеніи, вслѣдствіе индукціи, въ немъ тока, *возрастаетъ* сила тока, отвѣтвляющагося въ электромагнитъ, чрезъ что увеличивается напряженіе магнитнаго поля. *Болѣе подробное разсмотрѣніе теоріи такихъ двигателей показываетъ, что скорость вращенія якоря въ этихъ двигателяхъ измѣняется въ весьма малой степени при перемѣнѣ противодѣйствія движенію якоря.* Въ виду этого такіе двигатели, т. е. устроенные, какъ шунтъ-динамо, особенно удобны для приведенія въ дѣйствіе рабочихъ механизмовъ (различныхъ станковъ, буравовъ, пилъ и т. д.), въ которыхъ, понятно, во время работы можетъ значительно мѣняться противодѣйствіе движенію.

---

e — электродвижущая сила, получающаяся въ послѣднемъ, когда электродвигатель употребляется какъ динамо, т. е. при вращеніи его якоря какою-либо внѣшнею силою съ тою же скоростью, какая наблюдается при дѣйствіи двигателя.

Электродвигатели обоихъ типовъ въ настоящее время достаточно выработаны и съ успѣхомъ примѣняются на практикѣ. Эти электродвигатели, однако, требуютъ тока постояннаго направленія, а въ прошлую лекцію было уже сообщено о затрудненіяхъ, съ которыми сопряжена передача такого тока на большія разстоянія. Токъ перемѣнный въ состояніи также приводить въ дѣйствіе подобные электродвигатели, такъ какъ дѣйствіе магнитнаго поля на проводники съ токомъ не мѣняется при совмѣстномъ измѣненіи направленія силовыхъ линій и направленія тока въ самомъ проводникѣ, что и будетъ происходить во всякой динамомашинѣ при пропусканіи чрезъ нее перемѣннаго тока, но пользованіе перемѣннымъ токомъ при этомъ является весьма мало экономичнымъ. Два обстоятельства являются причиною этого, а именно, во-первыхъ, очень большое сопротивленіе, какое *видимымъ образомъ* представляетъ обмотка электромагнита машины перемѣнному току, и, во-вторыхъ, сильныя искры между щетками и коллекторомъ якоря, которыя получаются въ данномъ случаѣ и которыя портятъ самый коллекторъ двигателя. Оба эти явленія представляютъ собою слѣдствіе самоиндукціи, возникающей въ катушкахъ электромагнита и обмоткѣ якоря вслѣдствіе частыхъ перемѣнъ направленія тока. Эти два обстоятельства и не позволяютъ электродвигатель, предназначаемый для тока постояннаго направленія, питать токомъ перемѣннымъ.

Для токовъ перемѣнныхъ устраиваются электродвигатели, совсѣмъ особой конструкціи. Почти во всѣхъ подобныхъ двигателяхъ, состоящихъ изъ тѣхъ же главныхъ частей, какъ и динамомашины или электродвигатели съ постояннымъ токомъ, т. е. изъ электромагнитовъ (только здѣсь употребляются обыкновенно нѣсколько электромагнитовъ) и якоря, *электромагниты питаются особымъ токомъ постояннаго направленія*, получающимся отъ небольшой динамомашины, а *перемѣнный токъ пропускается лишь по обмоткѣ якоря*. Кромѣ того обыкновенно, по крайней мѣрѣ въ лучшихъ электродвигателяхъ, какъ, напр., въ электродвигателяхъ Ганца, электромагниты приводятся въ движеніе, якорь же остается неподвижнымъ. При питаніи электромагнитовъ токомъ постояннаго направленія силовыя линіи въ магнитномъ полѣ сохраняютъ неизмѣннымъ свое направленіе отъ одной полюсной поверхности къ другой. Дѣйствіе магнитнаго поля на якорь, *въ которомъ токъ непрерывно*

мѣнять свое направленіе (или, обратно, дѣйствіе якоря на электромагниты, создающіе магнитное поле), только тогда будетъ происходить постоянно въ одну сторону, когда относительное положеніе якоря и электромагнитовъ будетъ мѣняться вполнѣ согласно съ измѣненіемъ направленія тока въ якорѣ. Въ самомъ дѣлѣ, если какая-либо часть обмотки якоря отталкивается отъ одной полюсной поверхности электромагнита и притягивается слѣдующею, то эта часть будетъ продолжать испытывать дѣйствіе отъ послѣдней полюсной поверхности въ прежнюю сторону лишь тогда, когда въ моментъ наибольшаго сближенія этой части якоря и этой полюсной поверхности взаимное притяженіе между ними превращается во взаимное отталкиваніе, а для этого необходимо въ этотъ моментъ измѣненіе направленія тока въ якорѣ. Итакъ, *вращеніе подвижной части электродвигателя должно соотвѣтствовать быстротѣ измѣненія направленій перемѣннаго тока*, т. е. *это вращеніе должно быть синхронично* (должно имѣть одинаковую скорость) *съ вращеніемъ подвижной части машины, посылающей перемѣнный токъ*. Всякое нарушеніе подобнаго синхронизма будетъ имѣть слѣдствіемъ разстройство въ правильности получаемыхъ подвижною частью электродвигателя импульсовъ всегда въ одну сторону, а слѣдовательно, и прекращеніе движенія этой части. Понятно также, что прежде чѣмъ пропускать перемѣнный токъ чрезъ якорь двигателя, подвижную часть этого двигателя необходимо чѣмъ-либо привести во вращеніе, синхроничное съ періодомъ перемѣннаго тока, и только по достиженіи этого замкнуть черезъ якорь перемѣнный токъ. То и другое является въ значительной степени неудобнымъ и очень часто вполнѣ препятствуетъ употребленію подобныхъ двигателей. Но съ другой стороны мы видѣли, на сколько выгодно пользоваться перемѣннымъ токомъ для передачи его на большія разстоянія. Эта выгода парализовалась затрудненіемъ въ примѣненіи такого тока для рабочей силы. Нынѣ это затрудненіе вполнѣ уничтожено. Устроены двигатели, сами приходящіе въ движеніе и дающіе вращеніе съ разнообразными скоростями, независимыми отъ періода перемѣнныхъ токовъ. Такіе двигатели суть такъ называемые *двигатели съ вращающимся магнитнымъ полемъ*.

Представимъ себѣ вертикально поставленный подковообразный магнитъ, помѣстимъ между полюсами этого магнита маг-

нитную стрѣлку, посаженную на вертикальной оси. Магнитный потокъ, существующій внутри магнита и между его концами, какъ мы знаемъ, направитъ стрѣлку ея длиною по направленію отъ одного полюса магнита къ другому. Повернемъ нашъ магнитъ около вертикальной оси, отъ этого измѣнится въ пространствѣ направленіе магнитнаго потока, а слѣдовательно повернется вмѣстѣ съ этимъ и магнитная стрѣлка. Станемъ непрерывно вращать магнитъ около вертикальной оси; силовыя линіи между его концами точно также придутъ въ непрерывное вращеніе и возбудятъ *вращающееся магнитное поле.* Магнитная стрѣлка, помѣщенная въ такомъ полѣ, придетъ въ движеніе и будетъ вращаться одинаково съ вращеніемъ направленія силовыхъ линій. Помѣстимъ въ пространствѣ между полюсами магнита способную вращаться около вертикальной оси плоскую, замкнутую своими концами, катушку изъ мѣдной проволоки и расположимъ ее такъ, что плоскость оборотовъ этой катушки будетъ вертикальна. При движеніи магнита, т. е. при образованіи вращающагося магнитнаго поля, число силовыхъ линій, пронизывающихъ плоскость оборотовъ такой катушки, будетъ непрерывно измѣняться отъ нѣкотораго максимума до нуля и затѣмъ снова до нѣкотораго максимума только въ противоположномъ направленіи, потомъ опять до нуля и т. д. Вслѣдствіе постояннаго измѣненія числа пронизывающихъ катушку силовыхъ линій въ ней будутъ развиваться индукціонные токи, а результатомъ возникновенія въ ней токовъ явится механическое дѣйствіе магнитнаго поля на катушку. Если въ данномъ случаѣ приложить основной законъ индукціи токовъ въ замкнутомъ проводникѣ, а также законъ дѣйствія магнитнаго поля на проводникъ съ токомъ, то безъ труда можно будетъ притти къ заключенію, *что находящаяся во вращающемся магнитномъ полѣ катушка получитъ стремленіе вращаться около вертикальной оси по тому же направленію, по которому происходитъ вращеніе силовыхъ линій поля.* Чѣмъ больше будетъ разнится скорость вращенія силовыхъ линій отъ скорости вращенія катушки, тѣмъ быстрѣе будетъ происходить измѣненіе числа силовыхъ линій пронизывающихъ катушку, тѣмъ сильнѣе будутъ появляться въ ней индукціонные токи, а слѣдовательно, тѣмъ значительнѣе будетъ и дѣйствіе поля на эту катушку. Такимъ образомъ, при

возбужденіи вращающагося магнитнаго поля наибольшіе импульсы къ вращенію катушка будетъ получать въ самомъ началѣ, когда она въ покоѣ или когда только что пришла въ движеніе. Подъ вліяніемъ непрерывнаго дѣйствія поля скорость вращенія катушки станетъ далѣе увеличиваться, стремясь сравняться со скоростью вращенія поля. Если вращенію катушки представляется какое-либо сопротивленіе, другими словами, если катушка при своемъ движеніи должна совершать нѣкоторую работу, то она будетъ вращаться съ такою скоростью, при которой вслѣдствіе существующей разности скоростей вращенія поля и катушки дѣйствіе на нее поля будетъ достаточно для преодолѣнія оказываемаго катушкѣ сопротивленія. Однако, въ различные моменты, какъ не особенно трудно расчетомъ подтвердить это, дѣйствіе поля на катушку будетъ не одинаково. Это дѣйствіе будетъ мѣняться отъ нѣкоторой наибольшей положительной до нѣкоторой наибольшей отрицательной величины, однимъ словомъ, оно будетъ пульсирующимъ [1]), отсюда и самое движеніе катушки будетъ также пульсирующаго характера. Явленіе измѣнится, если мы помѣстимъ во вращающемся магнитномъ полѣ двѣ замкнутыя катушки, образующія другъ съ другомъ плоскостями своихъ оборотовъ прямой уголъ или возьмемъ нѣсколько паръ катушекъ, составляющихъ одна съ другою постоянный уголъ. Въ этомъ случаѣ при совмѣстномъ вращеніи всѣхъ этихъ катушекъ во вращающемся магнитномъ полѣ *дѣйствіе на ихъ совокупность*

---

[1]) Расчетъ даетъ слѣдующее (приближенное) выраженіе для величины момента вращенія (F_1), испытываемаго катушкою во вращающемся магнитномъ полѣ въ какой-либо моментъ времени t:

$$F_1 = A \cdot \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} \varphi \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot \cos \frac{2\pi}{T} (t - \varphi),$$

Здѣсь A—величина, зависящая отъ напряженія магнитнаго поля и сопротивленія катушки; T—періодъ измѣненія числа силовыхъ линій, пронизывающихъ плоскости оборотовъ катушки, т. е. $\frac{1}{T} = \Omega - \omega$, гдѣ Ω—угловая скорость вращенія магнитнаго поля, а ω—угловая скорость вращенія катушки и, наконецъ, φ выражается чрезъ $\operatorname{tg} \frac{2\pi}{T} \varphi = \frac{2\pi}{T} \frac{L}{R}$, гдѣ L обозначаетъ коэффиціентъ самоиндукціи катушки, а R—ея сопротивленіе.

во все время ихъ вращенія съ извѣстною скоростью остается однимъ и тѣмъ же [1]).

Нѣсколько соединенныхъ другъ съ другомъ и составляющихъ между собою опредѣленный уголъ замкнутыхъ плоскихъ катушекъ можно замѣнить однимъ толстымъ горизонтальнымъ мѣднымъ дискомъ, вращающимся на вертикальной оси. Въ такомъ дискѣ, помѣщенномъ между полюсами вращающагося магнита, возбуждается система индукціонныхъ токовъ и является дѣйствіе на него вращающагося поля. Дискъ приходитъ въ движеніе, постоянно стремясь догонять вращающійся магнитъ. Этотъ опытъ является *обратнымъ* знаменитому опыту Араго, въ которомъ вращающійся мѣдный дискъ увлекалъ за собою во вращеніе находящуюся надъ дискомъ магнитную стрѣлку, и который былъ названъ Араго опытомъ, показывающимъ *явленіе магнетизма вращенія.*

Какъ извѣстно изъ третьей лекціи, напряженіе магнитнаго поля между полюсами подковообразнаго магнита увеличивается при введеніи въ это пространство желѣза, ибо въ послѣднемъ случаѣ магнитный потокъ испытываетъ меньшее сопротивленіе, а потому сила его возрастаетъ. Въ виду этого для описаннаго только что опыта движенія во вращающемся магнитномъ полѣ выгодно наматывать катушки на желѣзный короткій цилиндръ или, еще лучше составлять послѣдній изъ нѣсколькихъ кружковъ желѣза, отдѣленныхъ другъ отъ друга тонкою бумагою. Обороты катушекъ при этомъ накладываются на желѣзо такъ, что плоскости параллельны оси цилиндра и раздѣляютъ послѣдній по оси на двѣ равныя части.

Мы познакомились съ весьма важнымъ свойствомъ вращающагося магнитнаго поля, со способностью его приводить въ движеніе находящійся въ немъ въ опредѣленномъ положеніи замкнутый проводникъ для тока. Но мы предполагали, что само вращающееся

---

[1]) Расчетъ даетъ для момента вращенія, испытываемаго совокупностью двухъ взаимно перпендикулярныхъ плоскихъ катушекъ въ какой-либо моментъ времени во вращающемся магнитномъ полѣ, выраженіе (также приближенное):

$$P_2 = A \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\sin 2\frac{2\pi}{T}\varphi}{2},$$

т. е. не зависимое отъ времени t.

поле образуется механически: вращеніемъ магнита или электромагнита. Въ 1885 г. итальянскому ученому Феррарису пришла идея возбужденія подобнаго поля не путемъ механическимъ, а при посредствѣ примѣненія двухъ отдѣльныхъ перемѣнныхъ токовъ, имѣющихъ опредѣленное отношеніе между собою. Опыты Феррариса имѣли вполнѣ научный характеръ, безъ какого-либо приложенія къ практикѣ. Даже замѣтка объ этихъ опытахъ, т. е. о новомъ способѣ возбужденія вращающагося магнитнаго поля, явилась въ печати всего въ 1888 г. и только позже, послѣ попытокъ американскаго электрика Тесла устроить на этомъ началѣ электродвигатель, вращающееся магнитное поле обратило на себя вниманіе электротехниковъ. Первому г. Доливо-Добровольскому принадлежитъ честь успѣшнаго, и въ большихъ размѣрахъ, практическаго рѣшенія задачи образованія такого поля и пользованія имъ, какъ источникомъ рабочей силы. Электродвигатель г. Доливо-Добровольскаго, въ 100 лошадиныхъ силъ, впервые дѣйствовалъ осенью 1891 г. на Франкфуртской электрической выставкѣ.

Обратимся сначала къ опыту Феррариса. Сдѣлаемъ изъ двухъ изолированныхъ проволокъ нѣсколько оборотовъ, имѣющихъ форму удлиненнаго прямоугольника и тѣсно расположенныхъ другъ къ другу, и помѣстимъ двѣ системы этихъ оборотовъ, плоскостями ихъ вертикально, крестъ на крестъ подъ прямымъ угломъ одна къ другой. Пропустимъ по каждой такой системѣ оборотовъ перемѣнный токъ. *Пусть два эти тока будутъ одного періода,* т. е. число измѣненій направленія въ единицу времени въ томъ и другомъ токѣ одно и то же, *пусть и амплитуда,* т. е. наибольшая сила ихъ, *одинакова,* но *пусть одинъ токъ запаздываетъ относительно другого на четверть своего полнаго періода.* Послѣднее выражаетъ то, что въ тотъ моментъ, когда первый токъ достигъ своей наибольшей силы, сила второго равна нулю, когда затѣмъ сила перваго станетъ уменьшаться, второй будетъ усиливаться и, когда сила перваго сдѣлается нуль, второй достигаетъ своего максимума. Далѣе первый токъ измѣнитъ свое направленіе, увеличиваясь въ силѣ, второй еще сохранитъ свое первоначальное направленіе, постепенно лишь ослабѣвая и т. д. Такіе два перемѣнныхъ тока въ отношеніи измѣненія ихъ силъ подобны двумъ колебаніямъ какой-либо точки, колебаніямъ, одного періода и одной амплитуды, но отличающимся другъ отъ друга

по фазѣ на 90°. Два подобныхъ тока названы системою двухфазныхъ перемѣнныхъ токовъ.

При прохожденіи такихъ двухъ перемѣнныхъ токовъ по двумъ системамъ оборотовъ, помѣщенныхъ накрестъ другъ къ другу, внутри этихъ оборотовъ, въ особенности вблизи ихъ общаго центра, *создается вращающееся магнитное поле*, подобное тому, какое получается при вращеніи вертикальнаго подковообразнаго магнита. Помѣщенная внутри этихъ оборотовъ на вертикальномъ остріѣ магнитная стрѣлка приходитъ во вращеніе (рис. 39). *Время, не-*

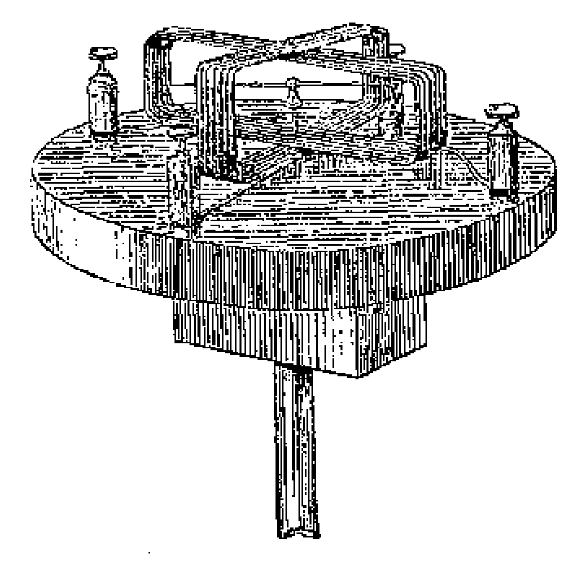


Рис. 39.

обходимое силовымъ линіямъ для совершенія полнаго оборота въ этомъ полѣ, равно періоду перемѣнныхъ токовъ, т. е. промежутку времени, отдѣляющему два послѣдовательныхъ момента, въ которые направленіе и сила перемѣннаго тока являются одинаковыми.

Въ самомъ дѣлѣ, магнитное поле, образующееся въ данномъ случаѣ внутри двухъ системъ оборотовъ, слагается изъ двухъ полей, соотвѣтствующихъ отдѣльно каждой системѣ. Магнитная сила, въ какой-либо моментъ времени дѣйствующая на магнитный полюсъ въ какой-нибудь точкѣ разсматриваемаго пространства, представляетъ собою равнодѣйствующую двухъ магнитныхъ силъ, происходящихъ отъ той и другой системы оборотовъ. Это равнодѣйствующая, какъ учитъ насъ механика, можетъ быть выражена діагональю параллелограмма, стороны котораго изображаютъ по

величинѣ и направленію слагаемыя силы. Итакъ, магнитный потокъ, пронизывающій пространство внутри оборотовъ, въ каждый моментъ времени нужно разсматривать, по закону параллелограмма, слагающимся изъ двухъ отдѣльныхъ потоковъ, возбуждаемыхъ токами въ двухъ системахъ оборотовъ. Оба эти магнитныхъ потока во всякій моментъ времени пропорціональны силамъ образующихъ ихъ токовъ. Сила же перемѣннаго тока мѣняется со временемъ (весьма близко) по закону гармоническихъ колебаній, т. е. такъ, какъ во время качанія маятника измѣняется по горизонтальной линіи разстояніе шарика маятника отъ вертикальной линіи, проходящей чрезъ положеніе покоя его. Направленія обоихъ слагающихся потоковъ, какъ мы знаемъ изъ третьей лекціи, перпендикулярны плоскостямъ соотвѣтствующихъ оборотовъ, а слѣдовательно, перпендикулярны и взаимно. Проведя мысленно чрезъ общій центръ двухъ системъ оборотовъ двѣ взаимно перпендикулярныя линіи, будемъ для отдѣльныхъ послѣдовательныхъ моментовъ времени откладывать на этихъ линіяхъ величины, пропорціональныя силамъ соотвѣтствующихъ магнитныхъ потоковъ, при чемъ будемъ откладывать эти величины отъ точки пересѣченія взаимно перпендикулярныхъ линій и въ сторону направленія силовыхъ линій, и затѣмъ на отложенныхъ отрѣзкахъ будемъ строить параллелограммы и проводить діагонали. Мы получимъ, такимъ образомъ, направленіе и силу равнодѣйствующаго магнитнаго потока для каждаго такого момента. Сдѣлавъ подобное построеніе, мы и увидимъ, что сила равнодѣйствующаго магнитнаго потока во все время остается одна и та же, направленіе же его непрерывно измѣняется. Эта перемѣна въ направленіи магнитнаго потока происходитъ равномѣрно, и полный оборотъ магнитный потокъ совершаетъ въ теченіе времени одного полнаго измѣненія тока.

Такимъ-то образомъ *при помощи системы двухфазныхъ перемѣнныхъ токовъ, проходящихъ по двумъ взаимно перпендикулярнымъ своими плоскостями системамъ оборотовъ проволоки, въ пространствѣ внутри этихъ оборотовъ создается равномѣрно-вращающееся магнитное поле.* Подобное же поле образуется между полюсами двухъ крестъ-на-крестъ помѣщенныхъ одинаковыхъ подковообразныхъ электромагнитовъ, когда по обмоткамъ ихъ проходятъ перемѣнные токи, отличающіеся другъ отъ друга на

$^1/_4$ своего періода, т. е. когда для намагниченія этихъ электромагнитовъ примѣняется система двухфазныхъ перемѣнныхъ токовъ. Въ послѣднемъ случаѣ лишь напряженіе создающагося магнитнаго поля получается много больше, чѣмъ въ первомъ.

Все сказанное мною о вращающемся магнитномъ полѣ я могу иллюстрировать на маленькой модели двигателя (рис. 40). Два

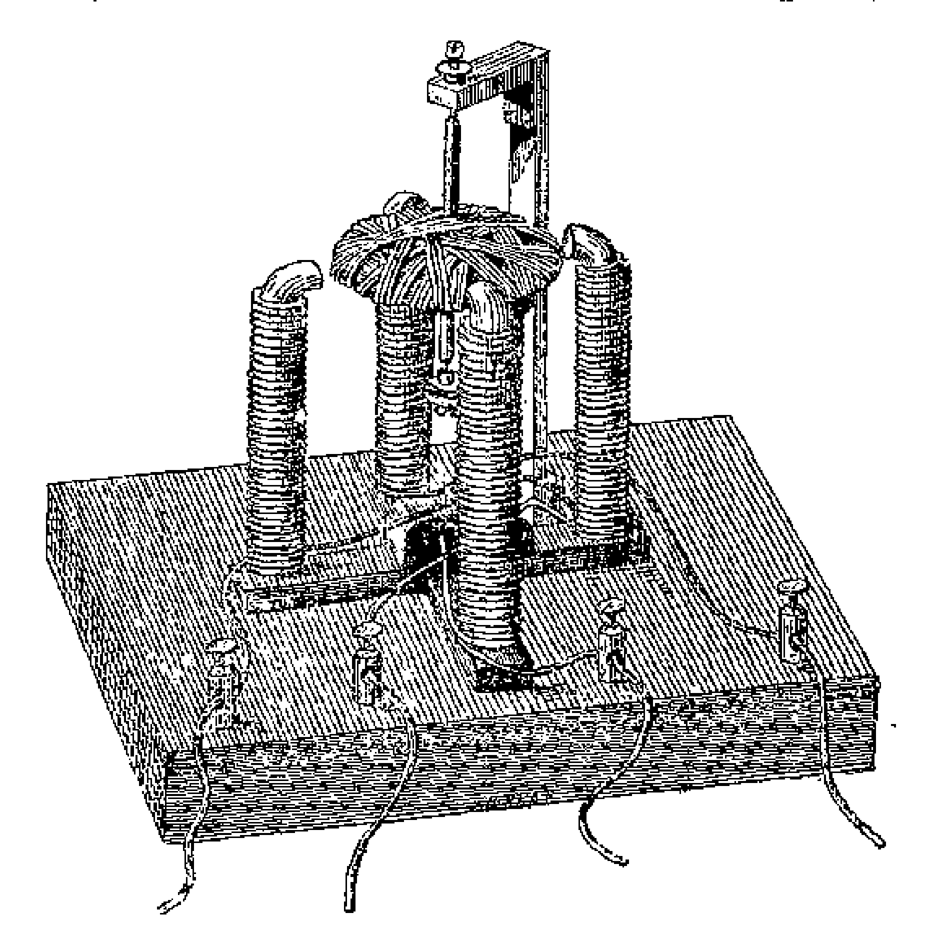


Рис. 40.

вертикальныхъ подковообразныхъ электромагнита расположены накрестъ и составляютъ между собою прямой уголъ. Между концами этихъ электромагнитовъ помѣщается подвижной (около вертикальной оси) якорь. Якорь состоитъ изъ трехъ желѣзныхъ кружковъ, отдѣленныхъ другъ отъ друга бумагою и окруженныхъ нѣсколькими системами оборотовъ мѣдной проволоки. Въ каждой такой системѣ три оборота и концы проволоки спаены другъ съ другомъ.

Всѣ системы оборотовъ, окружающія желѣзные кружки, составляютъ между собою одинъ и тотъ же уголъ. Отъ ручной магнитоэлектрической машины Грамма при употребленіи въ ней особаго, спеціально для данной цѣли сдѣланнаго кольца, получаются два перемѣнныхъ тока, по фазѣ отличающіеся на 90°. Я пропускаю эти токи по обмоткамъ двухъ электромагнитовъ. Якорь модели двигателя тотчасъ приходитъ въ движеніе. Обращаю ваше вниманіе на быстроту, съ какою измѣняется направленіе вращенія якоря, когда при посредствѣ коммутатора измѣняется соединеніе зажимовъ, находящихся на концахъ обмотки одного электромагнита, съ соотвѣтствующими зажимами машины. Это большое удобство въ двигателѣ.

Итакъ, эта модель можетъ дать понятіе о двигателѣ, приводимомъ въ дѣйствіе перемѣнными токами и отличающемся большою простотою въ устройствѣ, *не имѣющемъ никакого коллектора и никакихъ щетокъ*. Но двигатель, устроенный такимъ образомъ, не будетъ достаточно экономиченъ. Въ обмоткахъ электромагнитовъ развивается большая самоиндукція, значительно ослабляющая вступающій въ нихъ токъ, да и, наконецъ, *для проводки двухъ токовъ требуются четыре проводника*. Мы познакомимся дальше съ двигателями болѣе выгодными.

Чтобы покончить съ этимъ *двухфазнымъ* двигателемъ, я долженъ выяснить, какимъ образомъ вращающееся въ машинѣ Грамма кольцо даетъ два перемѣнныхъ тока, отличающихся по фазѣ на 90°. Возьмемъ желѣзный сердечникъ кольца Грамма и, раздѣливъ его по окружности на 4 равныя части, обмотаемъ изолированною проволокою первую четверть этого сердечника, какъ это дѣлается и въ обыкновенныхъ динамо, и два конца проволоки приготовленной обмотки соединимъ съ двумя мѣдными кольцами, помѣщенными изолированно на вращающейся оси кольца. Сдѣлаемъ то же со второю четвертью сердечника и также концы обмотки этой четверти соединимъ съ двумя другими кольцами, укрѣпленными на оси.

При вращеніи, устроеннаго такимъ образомъ, кольца въ магнитномъ полѣ между полюсными поверхностями подковообразнаго магнита или электромагнита, мы, при посредствѣ металлическихъ щетокъ или пружинокъ, нажимающихъ на мѣдныя кольца, соединенныя, какъ сказано, съ обмотками кольца, получимъ въ проводникахъ, которые заключаются между соотвѣтствующими

каждой обмоткѣ щетками, *два отдѣльныхъ перемѣнныхъ тока*. Но эти два тока въ каждый моментъ времени будутъ отличаться другъ отъ друга по силѣ, и это отличіе будетъ соотвѣтствовать какъ разъ четверти періода, т. е. *эти два тока составятъ систему двухфазныхъ перемѣнныхъ токовъ*. Въ самомъ дѣлѣ, причина того и другого тока въ любой моментъ времени — электродвижущая сила индукціи, являющаяся въ соотвѣтствующей обмоткѣ кольца вслѣдствіе вращенія кольца. Очевидно, что въ теченіе всего полнаго оборота кольца въ магнитномъ полѣ, если только обѣ обмотки одинаковы, электродвижущія силы обоихъ токовъ пройдутъ чрезъ одинаковыя величины, но въ каждый отдѣльный моментъ эти силы будутъ различны. Мы знаемъ, что электродвижущая сила индукціи, возникающая въ каждомъ оборотѣ обмотки, а слѣдовательно, и электродвижущая сила, слагающаяся изъ всѣхъ ихъ въ цѣлой обмоткѣ (соотвѣтствующей четверти кольца), будетъ мѣняться въ зависимости отъ движенія оборотовъ по отношенію къ направленію силовыхъ магнитныхъ линій въ полѣ. Электродвижущая сила индукціи въ каждомъ оборотѣ обмотки кольца опредѣляется числомъ силовыхъ линій, перерѣзываемыхъ внѣшними частями оборота. Это же число для одного и того же промежутка времени будетъ неодинаково, смотря по тому, какъ движется проволока относительно силовыхъ линій. Оно будетъ наибольшее, когда направленіе движенія перпендикулярно силовымъ линіямъ и наименьшее, т. е. нуль, когда это направленіе параллельно послѣднимъ.

Вторая четверть кольца въ каждый моментъ времени находится въ такомъ положеніи въ магнитномъ полѣ, въ какое придетъ первая четверть позже, черезъ четверть времени полнаго оборота. Отсюда слѣдуетъ, что и электродвижущая сила, возникающая въ этотъ моментъ во всей обмоткѣ второй четверти кольца, будетъ имѣть ту величину, какая получается въ обмоткѣ первой четверти *позже* по времени, *позже на четверть времени полнаго оборота кольца*. Соотвѣтственно электродвижущимъ силамъ и токи, вызываемые въ *одинаковыхъ* проводникахъ, будутъ отличаться другъ отъ друга подобнымъ же образомъ. Но время полнаго оборота кольца въ магнитномъ полѣ и есть *періодъ* измѣненія силы каждаго получающагося при этомъ перемѣннаго тока. Такимъ образомъ, два тока въ своемъ развитіи постоянно отличаются другъ отъ друга такъ,

какъ отличается сила каждаго тока въ моменты, промежутокъ между которыми равенъ четверти періода измѣненія тока. Два эти тока, слѣдовательно можно сказать, разнятся другъ отъ друга *по фазѣ на 90°*.

Очевидно, что, если мы продолжимъ обмотку и на другую половину сердечника, т. е. обмотаемъ отдѣльно третью и четвертую четверти сердечника, мы будемъ и въ этихъ обмоткахъ имѣть подобное же. Электродвижущая сила, являющаяся въ третьей четверти кольца (что видно непосредственно изъ положенія въ магнитномъ полѣ этой четверти по отношенію къ первой) будетъ

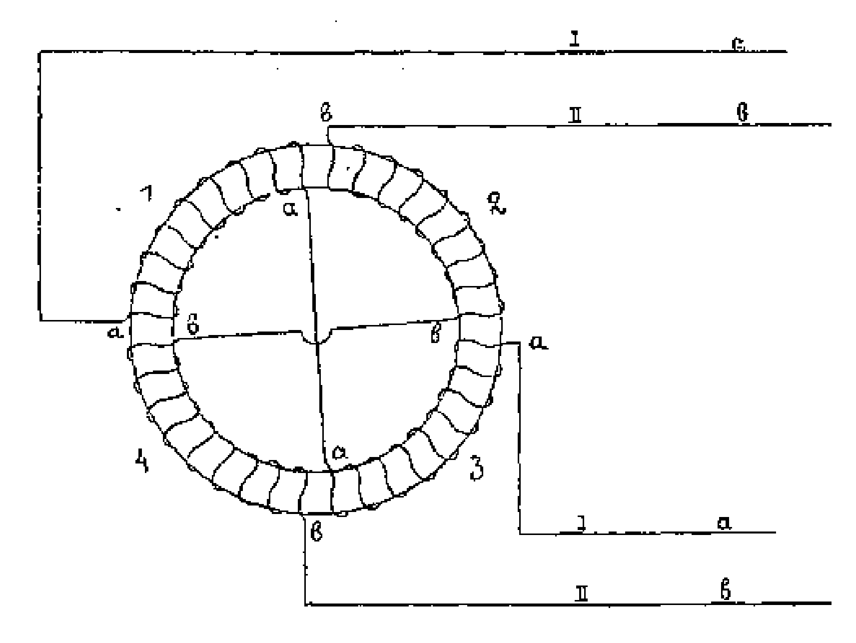


Рис. 41.

въ каждый моментъ времени діаметрально противоположна по направленію и одинакова по величинѣ электродвижущей силѣ, возникающей въ первой четверти. То же для второй и четвертой четвертей. Понятно теперь, что, если мы соединимъ вмѣстѣ конецъ обмотки первой четверти и конецъ обмотки третьей, а начала обѣихъ обмотокъ присоединимъ къ металлическимъ кольцамъ, мы будемъ имѣть въ цѣпи, замыкаемой проводникомъ, оканчивающимся щетками, прикасающимися къ этимъ кольцамъ, въ любой моментъ электродвижущую силу *въ два раза большую*, чѣмъ при употребленіи только одной четверти кольца. Также соеди-

нимъ и двѣ остальныя обмотки другъ съ другомъ и съ соотвѣтствующими кольцами (рис. 41).

Такъ и устроено кольцо, при посредствѣ котораго ручная магнитоэлектрическая машина Грамма даетъ два *двухфазныхъ тока*, приводящихъ въ движеніе описанную раньше модель двигателя.

Мы видимъ, что въ такомъ кольцѣ для каждаго тока предназначается собственно половина обмотки всего кольца, только эта половина составляется изъ двухъ несмежныхъ другъ съ другомъ четвертей обмотки. Раздѣлимъ теперь по окружности сердечникъ кольца на *три* равныя части и обмотаемъ каждую *треть* отдѣльною обмоткою, но сдѣлаемъ всѣ эти три обмотки одинаковыми. Разсуждая подобнымъ же образомъ, какъ раньше, мы придемъ къ

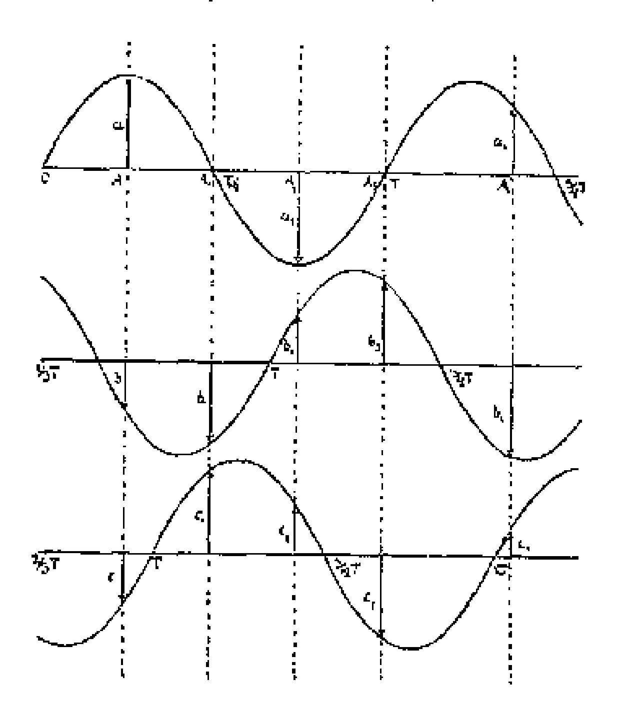


Рис. 42.

заключенію, что при вращеніи такого кольца въ магнитномъ полѣ между полюсными поверхностями магнита каждая треть кольца будетъ давать перемѣнный токъ, но токъ первой трети кольца будетъ всегда по развитію опаздывать относительно тока во второй трети на время, равное $^1/_3$ всего періода перемѣннаго тока. То же будетъ для второй и третьей третей кольца. Такимъ образомъ *при вращеніи подобнаго кольца мы можемъ получить три тока,*

отличающіеся другъ отъ друга такъ, какъ отличается сила каждаго тока въ два момента, отстоящіе по времени на $^1/_3$ *полнаго періода, т. е. имѣющіе разность фазъ, равную 120°*. Графически измѣненіе со временемъ силы каждаго такого перемѣннаго тока, какъ было уже объ этомъ сообщено въ предыдущей лекціи, весьма близко выражается кривою, извѣстною подъ именемъ синусоиды. Вмѣстѣ всѣ три тока графически должны быть изображены тремя синусоидами, смѣщенными одна относительно другой на треть длины, выражающей разстояніе отъ начала до конца синусоиды (рис. 42).

Если мы обратимъ теперь вниманіе на величины силъ этихъ трехъ токовъ въ любой моментъ времени, что легко получить изъ чертежа [для этого достаточно измѣрить разстояніе точекъ на кривыхъ *(ординаты кривыхъ)* отъ соотвѣтствующихъ горизонтальныхъ прямыхъ *(оси абсциссъ)*, по которымъ отложено время, взявъ при этомъ точки на трехъ синусоидахъ, относящіяся до одного и того же момента], то мы получимъ весьма важное соотношеніе между этими величинами. *Для всякаго момента времени сумма силъ двухъ токовъ, имѣющихъ одинаковое направленіе, равна силѣ третьяго тока, направленіе котораго въ это время противоположно* (на чертежѣ противоположныя направленія токовъ выражаются противоположными относительно оси абсциссъ направленіями ординатъ). Вообразимъ теперь, что два сосѣдніе проводника, одинъ, идущій отъ конца обмотки первой трети кольца, другой, идущій отъ начала слѣдующей обмотки, т. е. обмотки второй трети, по всей своей длинѣ сложены вмѣстѣ не изолированными или, что будетъ лучше, замѣнены *однимъ* проводникомъ; вообразимъ, что то же самое сдѣлано и съ двумя другими сосѣдними парами проводниковъ. Мы получимъ такимъ образомъ вмѣсто шести *три* внѣшнихъ проводника. Соединимъ ихъ вмѣстѣ концами. Каждый изъ этихъ проводниковъ направляется изъ конца обмотки одной трети кольца и въ то же время изъ начала обмотки слѣдующей. На самомъ дѣлѣ достигается все это тѣмъ, что сердечникъ кольца сплошь вокругъ обматывается проволокою, какъ въ обыкновенномъ Граммовскомъ кольцѣ, оба конца проволоки спаиваются вмѣстѣ и затѣмъ къ тремъ мѣстамъ на проволокѣ обмотки, раздѣляющимъ послѣднюю на три равныя части, припаиваются проволоки и отводятся къ тремъ отдѣльнымъ мѣднымъ кольцамъ, укрѣпленнымъ изолированными на вращающейся оси кольца; къ этимъ кольцамъ прижимаются мѣд-

ныя щетки, отъ которыхъ уже и отводятся внѣшніе проводники, соединенные на своихъ концахъ или непосредственно, или же при помощи промежуточныхъ между каждою парою отдѣльныхъ проводниковъ (рис. 43, 44). Весьма простой расчетъ, основан-

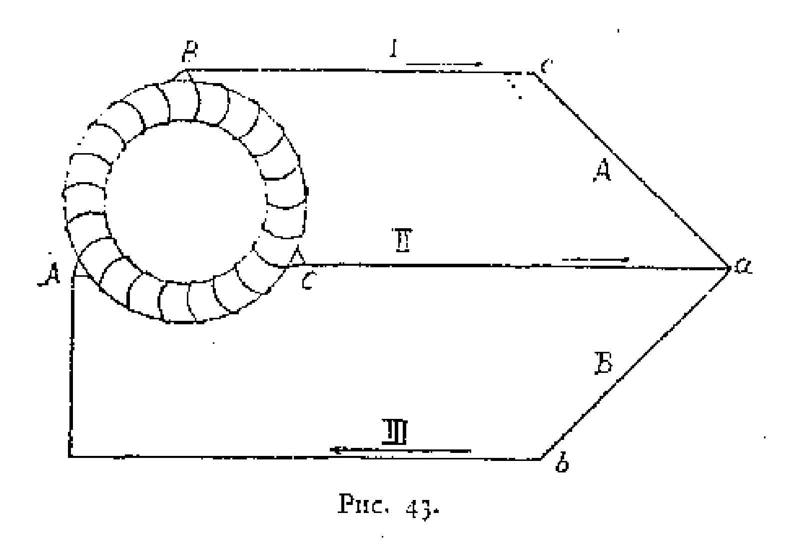


Рис. 43.

ный на законахъ развѣтвленія токовъ, покажетъ, что и въ данномъ случаѣ въ трехъ внѣшнихъ проводахъ, а также и въ поперечныхъ, ихъ соединяющихъ, вѣтвяхъ при вращеніи кольца въ

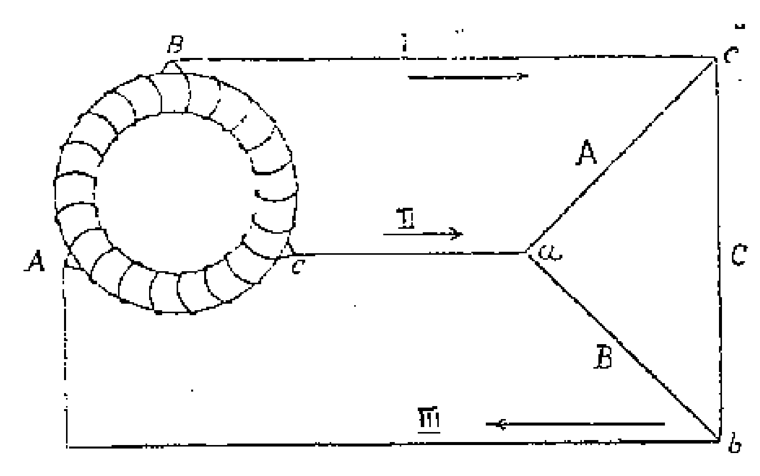


Рис. 44.

магнитномъ полѣ должны развиваться перемѣнные токи *съ разностью фазъ въ 120°*. Въ каждый моментъ времени сумма силъ двухъ токовъ, одного направленія, равняется силѣ третьяго тока,

направленія противоположнаго [1]). Такимъ образомъ *попеременно* въ одинъ изъ трехъ проводниковъ будутъ какъ будто сливаться два тока, распространяющіеся въ этотъ моментъ по двумъ другимъ проводникамъ. Такіе три перемѣнныхъ тока, передающіеся по тремъ отдѣльнымъ, но соединеннымъ вмѣстѣ на концахъ, проводникамъ и отличающіеся другъ отъ друга по фазѣ

---

[1]) Пусть электродвижущая сила, развивающаяся въ моментъ времени t въ обмоткѣ первой трети кольца, обозначается чрезъ e_1, въ обмоткѣ второй—чрезъ e_2 и въ обмоткѣ третьей—чрезъ e_3. На основаніи сказаннаго имѣемъ:

$$e_1 = E \, . \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

$$e_2 = E \, . \sin 2\pi \frac{t + \frac{1}{3} T}{T} = E \, . \sin \left[2\pi \frac{t}{T} + \frac{2\pi}{3}\right],$$

$$e_3 = E \, . \sin 2\pi \frac{t + \frac{2}{3} T}{T} = E \, . \sin \left[2\pi \frac{t}{T} + \frac{4\pi}{3}\right].$$

Отсюда:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

Пусть сопротивленія трехъ обмотокъ кольца r_1, r_2, r_3 одинаковы, т. е., $r_1 = r_2 = r_3$. Обозначимъ силы токовъ въ обмоткахъ чрезъ i_1, i_2, i_3, силы токовъ во внѣшнихъ проводникахъ—чрезъ J_1, J_2, J_3 и въ случаѣ соединенія послѣднихъ проводниками, расположенными въ видѣ треугольника, обозначимъ силы токовъ въ этихъ соединительныхъ проводникахъ чрезъ A, B, C. Обозначивъ сопротивленія всѣхъ внѣшнихъ проводниковъ, принявъ во вниманіе являющуюся въ нихъ самоиндукцію, и примѣнивъ къ разсматриваемой сложной цѣпи двѣ теоремы развѣтвленія токовъ Кирхгофа, можно опредѣлить силы токовъ J_1, J_2, J_3, а также и силы токовъ A, B, C.

Легко видѣть, что въ нашемъ случаѣ изъ уравненія

$$r_1 i_1 + r_2 i_2 + r_3 i_3 = e_1 + e_2 + e_3$$

слѣдуетъ:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0:$$

а изъ уравненій:

$$i_1 = J_1 + i_2$$
$$i_2 = J_2 + i_3$$
$$i_3 = J_3 + i_1$$

вытекаетъ:

$$J_1 + J_2 + J_3 = 0$$

Также легко получаются:

$$A = \frac{J_1 + J_2}{3}$$

$$B = \frac{J_2 - J_3}{3}$$

$$C = \frac{J_3 - J_1}{3}$$

на 120° составляютъ собою *систему трехфазныхъ перемѣнныхъ токовъ* или *вращающій токъ (Drehstrom)*.

Возьмемъ три электромагнита, изъ которыхъ каждый состоитъ изъ двухъ обмотанныхъ проволокою желѣзныхъ стержней, соединенныхъ на однихъ своихъ концахъ желѣзомъ и помѣстимъ эти электромагниты стержнями параллельно другъ другу, но такъ, чтобы ихъ осевыя линіи пересѣкались подъ равными углами (въ 60°) въ серединѣ между всѣми полюсами. Чтобы осуществить это, къ желѣзному вертикальному толстому диску привинчены перпендикулярно шесть желѣзныхъ стержней, они расположены по кругу и въ равныхъ разстояніяхъ другъ отъ друга. Каждые два діаметрально противоположныхъ стержня обмотаны какъ одинъ обыкновенный подковообразный электромагнитъ (рис. 45). Въ простран-

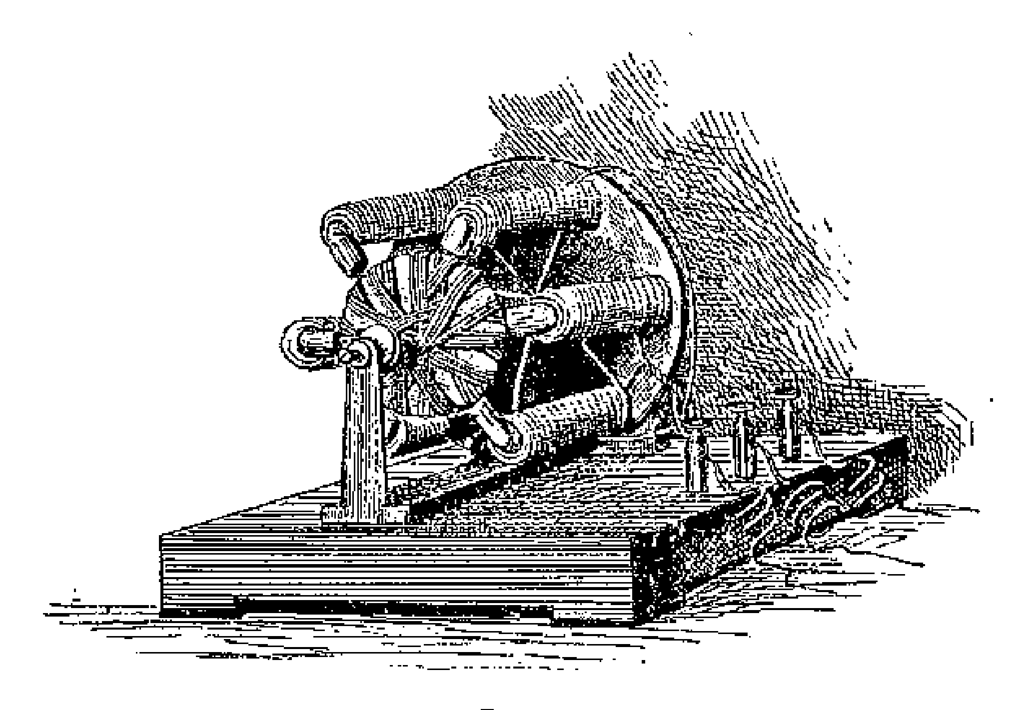


Рис. 45.

ствѣ между полюсами этихъ трехъ электромагнитовъ помѣщенъ на вращающейся горизонтальной оси составленый изъ отдѣльныхъ желѣзныхъ кружковъ дискъ, обмотанный проволокой такъ, какъ и въ описанной раньше модели *двухфазнаго* двигателя.

Вставимъ теперь въ междуполюсное пространство ручной магнитоэлектрической машины Грамма кольцо, сдѣланное, какъ

только что было объяснено, т. е., дающее систему трехфазныхъ токовъ, и къ тремъ щеткамъ этого кольца присоединимъ три отдѣльныхъ провода. Помѣстимъ между первымъ и вторымъ проводомъ обмотку одного электромагнита нашего прибора, между вторымъ и третьимъ проводомъ обмотку второго электромагнита и, наконецъ, между третьимъ и первымъ обмотку третьяго электромагнита.

При вращеніи кольца машины получится во внѣшнихъ проводахъ система трехфазныхъ перемѣнныхъ токовъ, подобная же система токовъ возбудится и въ обмоткахъ трехъ электромагнитовъ, представляющихъ собою соединительныя, поперечныя вѣтви для первыхъ трехъ проводовъ. Какъ увидимъ сейчасъ, между полюсами электромагнитовъ образуется въ этомъ случаѣ вращающееся магнитное поле, а слѣдовательно, находящійся въ немъ

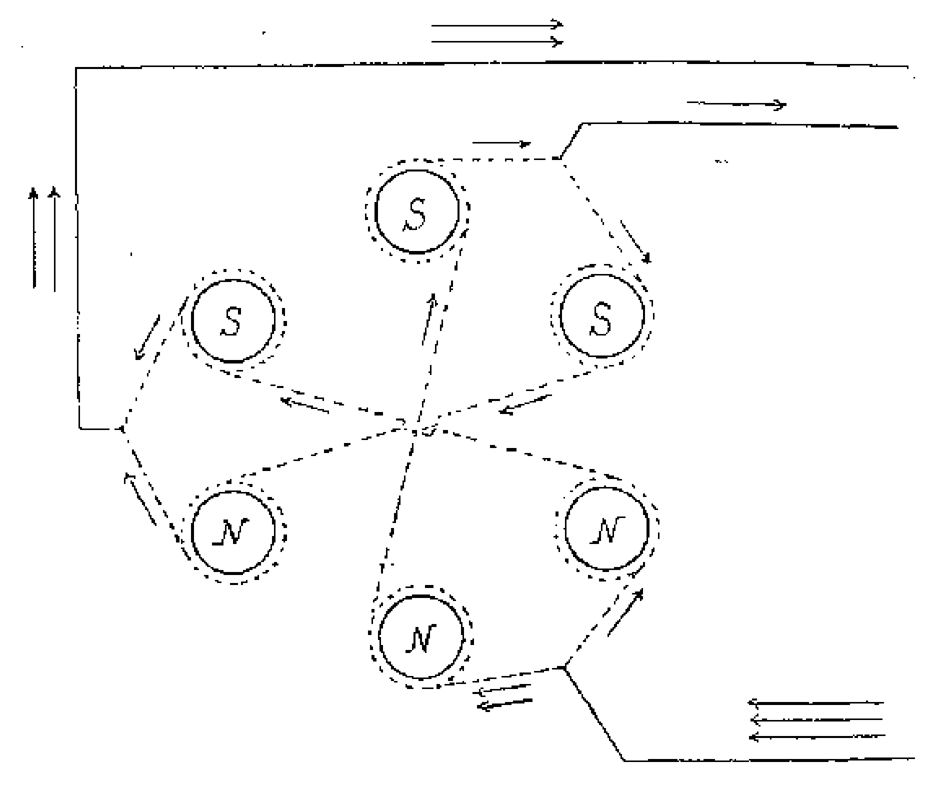


Рис. 46.

желѣзный, обмотанный проволокой дискъ долженъ притти во вращеніе. Я привожу въ дѣйствіе машину, и дискъ тотчасъ же приходитъ во вращеніе. Я измѣняю посредствомъ коммутатора

соединеніе обмотокъ электромагнита съ двумя проводами, дискъ останавливается и затѣмъ начинаетъ вращаться въ противоположную сторону. Такимъ образомъ, нашъ приборъ представляетъ собою двигатель или, лучше, модель двигателя, приводимаго въ дѣйствіе вращающимъ (трехфазнымъ) токомъ. Назовемъ для краткости такой двигатель— *трехфазнымъ двигателемъ*.

Отдадимъ себѣ отчетъ, какъ образуется здѣсь вращающееся магнитное поле. Для большей ясности я изображу на чертежѣ (рис. 46) три электромагнита схематически шестью кружками. Два діаметрально противоположные кружка представляютъ два полюса одного электромагнита. При возбужденіи токовъ въ общей цѣпи въ извѣстный моментъ времени всѣ шесть концовъ электромагнитовъ явятся извѣстнымъ образомъ намагниченными или, скажемъ лучше, каждый электромагнитъ образуетъ чрезъ воздухъ и желѣзо диска магнитный потокъ отъ одного своего конца къ другому. *Три магнитныхъ потока, возникшіе въ данный моментъ, сольются въ одинъ* подобнымъ же образомъ, какъ сливаются въ одинъ два взаимно перпендикулярныхъ потока двухъ электромагнитовъ въ двухфазномъ двигателѣ. И въ этомъ случаѣ, т. е. при трехъ магнитныхъ потокахъ, равнодѣйствующій потокъ надо опредѣлять по закону параллелограмма, лишь опредѣлять приходится по тремъ слагаемымъ, составляющимъ одинаковые углы (60°) другъ съ другомъ. (Желѣзо въ якорѣ, и въ двухфазномъ и въ трехфазномъ двигателѣ, какъ должно быть понятно изъ предыдущаго, въ значительной степени усиливаетъ являющіеся потоки). Въ слѣдующій за тѣмъ моментъ времени явленіе измѣнится. Сила каждаго магнитнаго потока вслѣдствіе измѣненія тока въ соотвѣтствующемъ ему электромагнитѣ получится иная, можетъ даже и направленіе перемѣниться (вѣдь токи, питающіе электромагниты, перемѣнные) — отсюда долженъ измѣниться и равнодѣйствующій потокъ. Если мы примемъ, что сила магнитнаго потока пропорціональна силѣ возбуждающаго его тока и сообразно съ измѣненіями токовъ въ электромагнитахъ для послѣдовательныхъ моментовъ опредѣлимъ силу и направленіе равнодѣйствующаго потока (изъ трехъ отдѣльныхъ), то мы найдемъ, что *сила равнодѣйствующаго магнитнаго потока все время будетъ оставаться одна и та же, направленіе же его будетъ непрерывно измѣняться, вращаясь около центра поля и описывая полный оборотъ*

въ теченіе времени полнаго измѣненія каждаго изъ трехъ токовъ. Однимъ словомъ, въ этомъ случаѣ получается равномѣрно вращающееся магнитное поле.

Я опишу теперь другую модель трехфазнаго двигателя [1]), болѣе соотвѣтствующую тому, что употребляется на самомъ дѣлѣ въ практикѣ. Вмѣсто трехъ электромагнитовъ взято желѣзное кольцо, окруженное тремя обмотками проволоки. Это кольцо, какъ и сердечникъ кольца Грамма, приготовлено изъ желѣзной проволоки. На рис. 47 ясно видно, какъ соединяются другъ съ

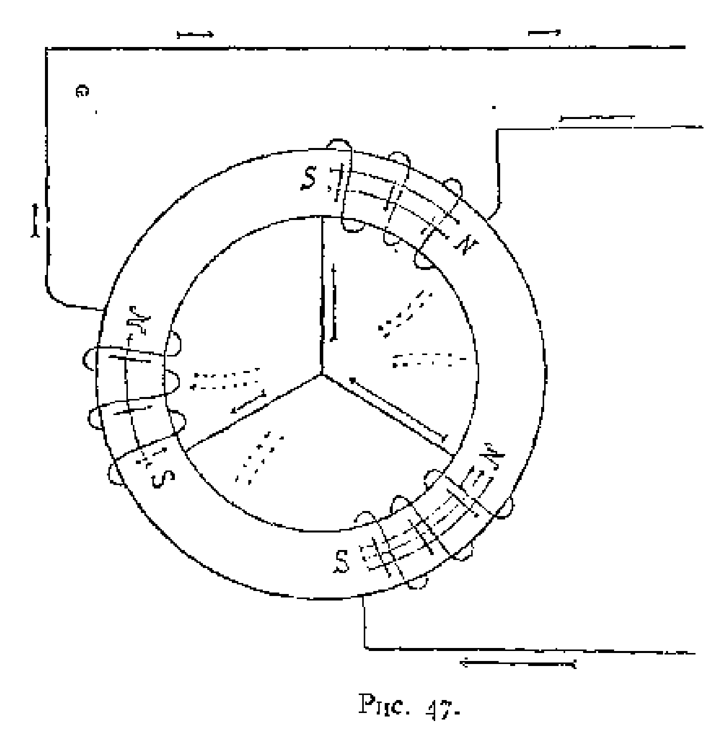


Рис. 47.

другомъ и съ внѣшними проводами три обмотки этого кольца. Здѣсь каждая обмотка составляетъ продолженіе одного провода. Всѣ три обмотки соединяются своими концами непосредственно. Внутри кольца, расположеннаго въ модели горизонтально, помѣщается вращающійся на вертикальной оси якорь, совершенно подобный ранѣе описаннымъ (рис. 48).

---

[1]) Модели двигателей съ вращающимся магнитнымъ полемъ, а также кольца, дающія системы двухфазныхъ и трехфазныхъ токовъ при вращеніи въ магнитномъ полѣ машины Грамма, приготовлены механикомъ С.-Петербургскаго Университета В. Л. Франценомъ.

Вслѣдствіе присутствія *железа* якоря *внутри* кольца, магнитный потокъ, возбуждающійся въ сердечникѣ кольца отъ тока въ каждой его обмоткѣ, при пропусканіи чрезъ эти обмотки системы трехфазныхъ перемѣнныхъ токовъ, *направляется* въ это желѣзо;

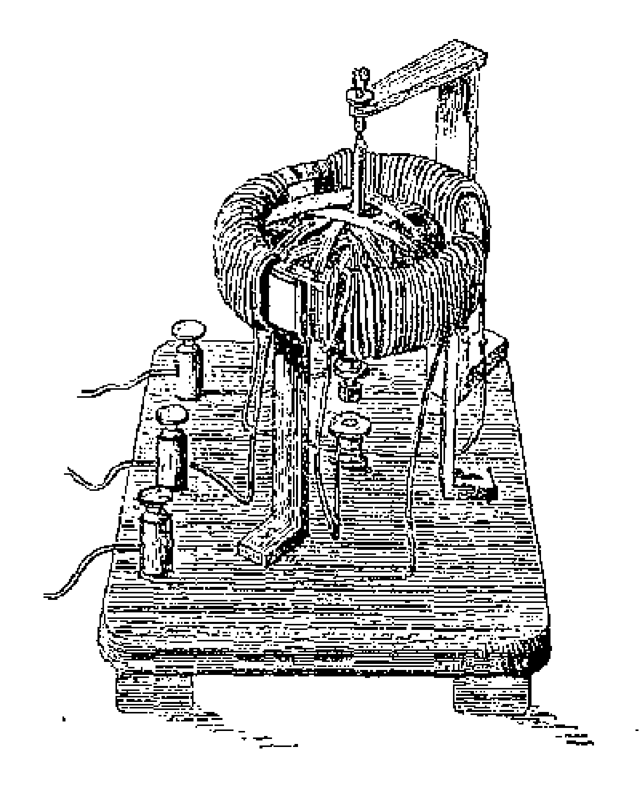


Рис. 48.

въ желѣзѣ якоря въ каждый моментъ времени *получается сложеніе трехъ отдѣльныхъ, непрерывно перемѣняющихся по силѣ и направленію, магнитныхъ потоковъ въ одинъ равнодѣйствующій.* Такимъ образомъ внутри кольца получается *вращающееся магнитное поле.*

Вы видите, якорь этой модели вращается, какъ только приходитъ въ дѣйствіе машина, дающая трехфазный токъ. Направленіе вращенія якоря тотчасъ же измѣняется, какъ только измѣняется соединеніе двухъ обмотокъ съ проводами. Такой двигатель обращаетъ на себя вниманіе своей простотой и, что особенно важно, онъ самъ приходитъ въ дѣйствіе. По свойствамъ вращающагося магнитнаго поля якорь этого двигателя при одномъ и томъ же противодѣйствіи вращенію можетъ обладать

различными скоростями въ зависимости отъ наибольшей силы трехъ токовъ. Въ самомъ дѣлѣ, отъ этой силы зависитъ сила магнитнаго потока, а слѣдовательно, и дѣйствіе поля на находящуюся въ немъ систему замкнутыхъ проводниковъ. Точно также, и обратно, при измѣненіи этой силы токовъ можно поддерживать одинаковую скорость вращенія якоря при различныхъ сопротивленіяхъ его движенію. Двигатель подобнаго типа удовлетворяетъ, повидимому, всѣмъ требованіямъ, которыя можно представить въ данномъ случаѣ, а примѣненіе въ немъ перемѣнныхъ токовъ упрощаетъ, какъ мы знаемъ, въ значительной степени передачу тока на большія разстоянія. Такого типа двигатель и былъ устроенъ г. Доливо-Добровольскимъ и впервые въ большихъ размѣрахъ эксплоатированъ во Франкфуртѣ осенью 1891 года. Хотя одновременно съ г. Доливо-Добровольскимъ былъ устроенъ подобнаго же типа двигатель Гассельвандеромъ, но, тѣмъ не менѣе, честь перваго *практическаго употребленія* такихъ двигателей несомнѣнно принадлежитъ нашему соотечественнику.

Въ заключеніе своихъ лекцій я и обращусь къ краткому описанію Лауфенъ-Франкфуртской передачи системы трехфазныхъ перемѣнныхъ токовъ и того двигателя, который работалъ на выставкѣ во Франкфуртѣ.

Въ мѣстечкѣ Лауфенъ, на р. Неккаръ, водою при посредствѣ турбины (въ 300 лошадиныхъ силъ) приводилась въ дѣйствіе машина, дававшая систему трехфазныхъ перемѣнныхъ токовъ. Эта машина была построена по идеѣ Броуна на извѣстномъ заводѣ Oerlikon, около Цюриха. Я опишу дальше ея устройство. Каждый изъ трехъ токовъ, выходившихъ изъ арматуры машины былъ очень большой силы (до 1400 амперовъ), но напряженіе такого тока было не велико (50 вольтъ). Однимъ словомъ, каждый изъ этихъ токовъ былъ какъ бы токъ, который получается, при непрерывномъ измѣненіи направленія, отъ батареи, состоящей всего изъ нѣсколькихъ десятковъ элементовъ, послѣдовательно соединенныхъ, но *громадныхъ* по своей величинѣ. Для передачи такого тока даже на небольшое разстояніе нужны очень толстые проводы. Въ Лауфенѣ три тока отъ машины передавались по мѣднымъ проводникамъ, діаметромъ въ 27 мм., къ тремъ трансформаторамъ. Такимъ образомъ, каждый изъ трехъ отдѣльныхъ

токовъ вступалъ въ свой особый трансформаторъ. Токъ проходилъ по толстой обмоткѣ трансформатора и тѣмъ возбуждалъ въ его тонкой, состоявшей изъ большого числа оборотовъ, обмоткѣ также перемѣнный, но уже большого напряженія (до 10000 вольтъ), хотя сравнительно слабый по силѣ, токъ. Три тока, прошедшіе чрезъ толстые обмотки трансформаторовъ, сходились вмѣстѣ въ точкѣ соединенія трехъ проводовъ. Это мѣсто соединенія толстыхъ проводовъ, какъ и точка соединенія *однихъ* концевъ трехъ отдѣльныхъ обмотокъ арматуры машины сообщались съ землею. На рис. 49 G схематически изображаетъ

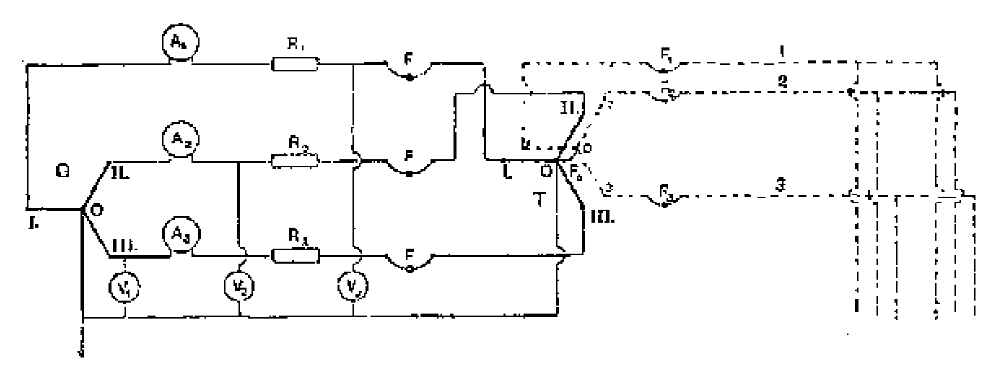


Рис. 49.

машину, при чемъ обмотки ея арматуры представлены толстыми линіями oI, oII, oIII. Толстыя обмотки *трехъ отдѣльныхъ* трансформаторовъ изображены въ T толстыми линіями oI, oII, oIII. Мѣста соединенія трехъ обмотокъ машины (o) и трехъ толстыхъ обмотокъ трансформаторовъ (o) были отведены, какъ уже сказано, въ землю, что изображено на схемѣ нижнею горизонтальною прямою линіею. Въ проводы отъ машины къ трансформаторамъ были включены три амметра (A_1, A_2, A_3) для измѣренія каждаго (изъ трехъ) тока, плавкіе предохранители (F) [1]) и, наконецъ, особые приборы (R_1, R_2, R_3), такъ называемые *магнитные реле*, назначеніе которыхъ прекращать дѣйствіе машины, возбуждающей токъ, лишь только вслѣдствіе какого-либо обстоятельства сила тока возрастетъ до извѣстнаго максимума или упадетъ до извѣстнаго минимума. Реле въ этихъ случаяхъ размы-

[1]) Плавкій предохранитель—это свинцовая проволока, которая берется такой толщины, что она при извѣстной максимальной силѣ тока плавится и тѣмъ размыкаетъ цѣпь.

каютъ токъ, возбуждающій въ машинѣ магнитное поле и получающійся, какъ увидимъ, отъ отдѣльной динамомашины. Наконецъ, между тремя проводами и землей были помѣщены вольтметры (V_1, V_2, V_3) для измѣренія напряженія трехъ перемѣнныхъ токовъ. Всѣ эти приборы были размѣщены на особой *распредѣлительной доскѣ* и удобно наблюдались надсмотрщикомъ. Въ трансформаторахъ (рис. 50) толстая и тонкая обмотки были отдѣлены масломъ. Опытъ показалъ, что масло лучше всего изолируетъ токи очень большого напряженія. Тонкія обмотки трехъ трансформаторовъ, соединенныя вмѣстѣ на одномъ изъ своихъ концовъ, на схемѣ изображенныя пунктирными линіями 01, 02, 03, — съ одной стороны въ мѣстѣ своего соединенія (о) сообщались съ мѣстомъ соединенія толстыхъ обмотокъ (о) чрезъ плавкій предохранитель F_0 и затѣмъ съ землею, съ другой стороны другими своими концами (1, 2, 3) присоединялись къ проводамъ, шедшимъ во Франкфуртъ. Разстояніе отъ Лауфена до Франкфурта равняется 175 километрамъ. Благодаря высокому напряженію токовъ, выходившихъ изъ трансформаторовъ въ Лауфенѣ, можно было отсюда передать въ Франкфуртъ токи по мѣднымъ проволокамъ, *діаметромъ всего въ 4 мм.*, т. е. немного толще, чѣмъ обыкновенныя телеграфныя. На схемѣ эти проволоки обозначены пунктирами 1, 2, 3. На рис. F_1, F_2, F_3 представляютъ собою плавкіе предохранители для тока высокаго напряженія. Такими предохранителями служили введенныя въ цѣпь пары мѣдныхъ проволокъ, длиною около 2,5 м. и діаметромъ всего въ 0,15 мм. Когда во Франкфуртѣ надо было дать знать въ Лауфенъ, чтобы была остановлена машина, тамъ соединяли проводы токовъ металлическимъ наугольникомъ— чрезъ это токъ значительно увеличивался въ своей силѣ и предохранители F_1, F_2 F_3, расплавлялись. Машинистъ въ Лауфенѣ тотчасъ замѣчалъ это и, остановивъ машину, присоединялъ къ концамъ проводовъ телефонъ, что дѣлалось и во Франкфуртѣ, и, такимъ

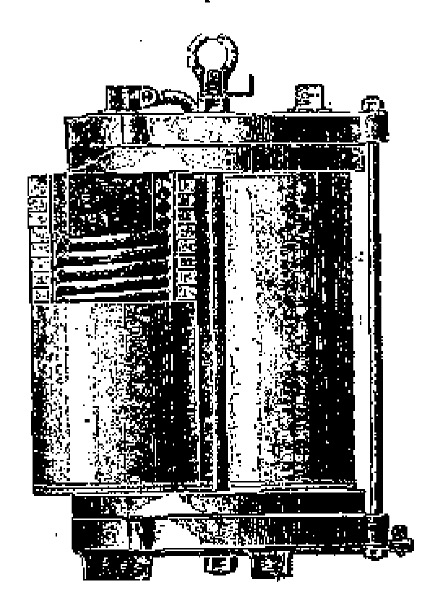


Рис. 50.

образомъ, могъ переговариваться съ Франкфуртомъ. — Проволоки всей линіи поддерживались особыми фарфоровыми изоляторами, большая часть которыхъ (изоляторы меньшаго размѣра) походили на колоколъ съ отогнутыми внутрь въ видѣ жолоба краями. Жолобъ этотъ наполнялся масломъ. Три изолятора поддерживались однимъ столбомъ, 8 м. высотою. Столбы отстояли другъ отъ друга на 60 метровъ. Переданные во Франкфуртъ три тока, отличавшіеся другъ отъ друга какъ и тѣ, изъ которыхъ они были трансформированы, на 120° по фазѣ, вступали каждый вновь въ отдѣльный трансформаторъ. Здѣсь только они вступали въ тонкія обмотки трансформаторовъ (*первичныя*) и трансформировались въ ихъ толстыхъ (*вторичныхъ*) обмоткахъ въ токи, большой силы и сравнительно небольшого напряженія (100 вольтъ). Далѣе *каждый* токъ раздѣлялся на два пути; на одномъ пути онъ проходилъ чрезъ калильныя лампы и приводилъ ихъ въ свѣченіе, на другомъ пути онъ встрѣчалъ обмотку электромагнита электродвигателя г. Доливо-Добровольскаго и проходилъ по послѣдней. Въ концѣ всѣ три тока, частью прошедшіе чрезъ лампы, частью прошедшіе чрезъ три обмотки электродвигателя, соединялись вмѣстѣ, т. е. три проводника трехъ перемѣнныхъ токовъ замыкались другъ съ другомъ въ одной точкѣ. Во Франкфуртѣ число лампъ (16 свѣчевыхъ), накаливавшихся передаваемымъ изъ Лауфена трехфазнымъ токомъ, доходило до 1060 и одновременно съ этимъ приходилъ въ дѣйствіе двигатель, соединенный съ центробѣжной помпой, доставлявшей воду для искусственнаго водопада. Этотъ двигатель былъ въ 100 лошадиныхъ силъ.

Электродвигатель г. Доливо-Добровольскаго для системы трехфазныхъ токовъ отличается отъ описанныхъ мною моделей такихъ двигателей существенно тѣмъ, что въ немъ *органъ, создающій вращающееся поле*, т. е. *внутренній* желѣзный цилиндръ, окруженный тремя обмотками, по которымъ проходятъ три тока, составляющіе вмѣстѣ систему трехфазныхъ токовъ, *вращается*, другая же часть двигателя, *якорь*, въ которомъ индуктируются токи, *остается неподвижнымъ*. Рис. 51 изображаетъ этотъ двигатель. Якорь этого двигателя представляетъ собою желѣзный цилиндръ, въ которомъ близко къ внутренней поверхности просверлены параллельно оси сквозныя отверстія; въ эти отверстія вставлены мѣдные стержни, на обоихъ концахъ своихъ металлически соеди-

ненные другъ съ другомъ такъ, какъ это дѣлается въ арматурѣ-барабанѣ динамомашины Сименса, но раздѣленные на три отдѣльныя системы (подобно тремъ обмоткамъ, составляющимъ между собою уголъ въ 120°). Эти три системы стержней соединяются вмѣстѣ на одномъ своемъ концѣ, другими же своими концами

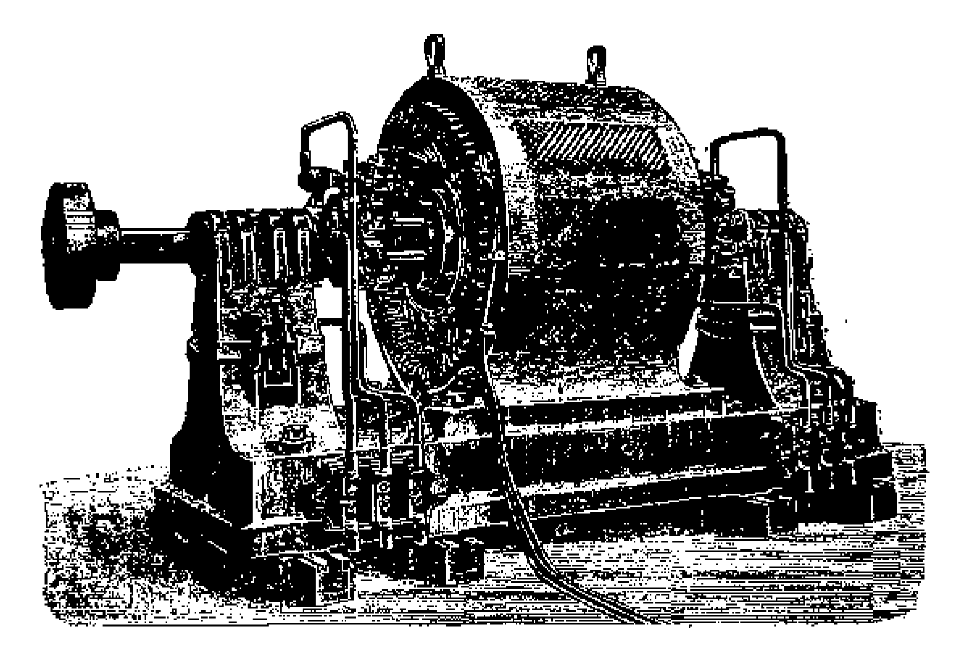


Рис. 51.

сообщаются съ тремя проводами, показанными на рисункѣ, спускающимися внизъ. Эти проводы ведутъ къ тремъ желѣзнымъ сосудамъ, изолированнымъ другъ отъ друга. Въ сосуды налита жидкость, щелочный растворъ, и въ каждый сосудъ опускается желѣзная пластинка. Три пластинки металлически соединены другъ съ другомъ. При пусканіи въ ходъ двигателя эти пластинки предварительно подымаются въ сосудахъ, чрезъ что весьма сильно увеличивается сопротивленіе всей цѣпи якоря, такъ какъ при этомъ вводятся въ эту цѣпь столбы жидкости. По мѣрѣ увеличенія скорости вращающагося внутренняго органа пластинки опускаются все больше и больше, пока, наконецъ, коснутся дна сосудовъ и, такимъ образомъ, произведутъ металлическое (*короткое*) замыканіе цѣпи, въ которой индуктируются токи. Это приспособленіе необходимо. Иначе, въ моментъ пропусканія трехфазныхъ токовъ чрезъ индуктирующую часть двигателя, *пока она въ покоѣ*, возбудились бы

чрезмѣрно сильные индукціонные токи въ якорѣ вслѣдствіе большой скорости вращенія создаваемаго магнитнаго поля и малаго сопротивленія якоря, и эти токи произвели бы реакцію на магнитное поле, почти вполнѣ уничтожая его. Это то и устраняется значительнымъ ослабленіемъ силы индуктированныхъ токовъ въ якорѣ увеличеніемъ сопротивленія его цѣпи чрезъ введеніе въ нее жидкихъ столбовъ. — Двигатель г. Доливо-Добровольскаго и отличается именно тѣми преимуществами, о которыхъ было сказано мною при описаніи электродвигателей съ вращающимся магнитнымъ полемъ. Его не надо, какъ другіе двигатели

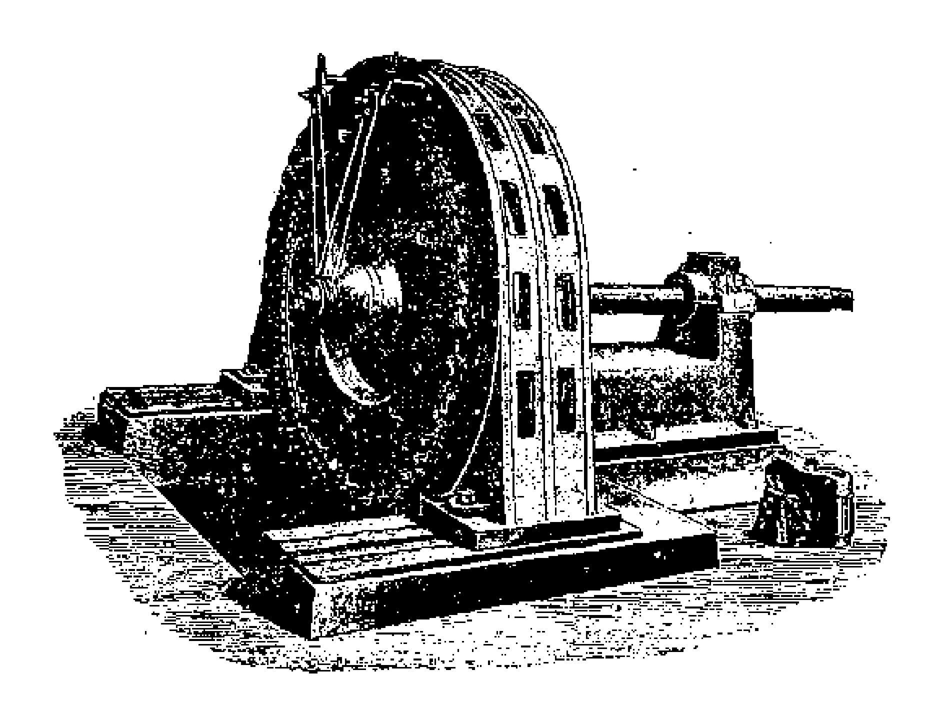


Рис. 52.

для перемѣнныхъ токовъ, предварительно постороннею силою приводить въ движеніе раньше, чѣмъ будетъ пущенъ токъ чрезъ него. Онъ самъ приходитъ въ дѣйствіе. Его движеніе не синхронично съ машиною, а потому, смотря по надобностямъ, скорость вращенія, получаемая въ немъ, можетъ быть весьма различная. Наконецъ, онъ быстро измѣняетъ направленіе своего движенія при перемѣнѣ направленія тока, поступающаго въ одну обмотку его электромагнита. Г. Доливо-Добровольскій устроилъ и другой двигатель для *малыхъ силъ*, много проще сейчасъ описаннаго.

Подобнымъ двигателямъ принадлежитъ будущность. Въ настоящее время имѣется нѣсколько видоизмѣненій такихъ двигателей. Я не буду входить однако въ подробныя описанія этихъ двигателей. Сказаннаго мною, полагаю, достаточно для выясненія идеи примѣненія вращающагося магнитнаго поля.

Мнѣ остается познакомить въ короткихъ словахъ съ устройствомъ машины Броуна, дававшей въ Лауфенѣ систему трехфазныхъ токовъ. Рис. 52 даетъ представленіе о внѣшнемъ видѣ машины. Индукціонный органъ этой машины, ея арматура или

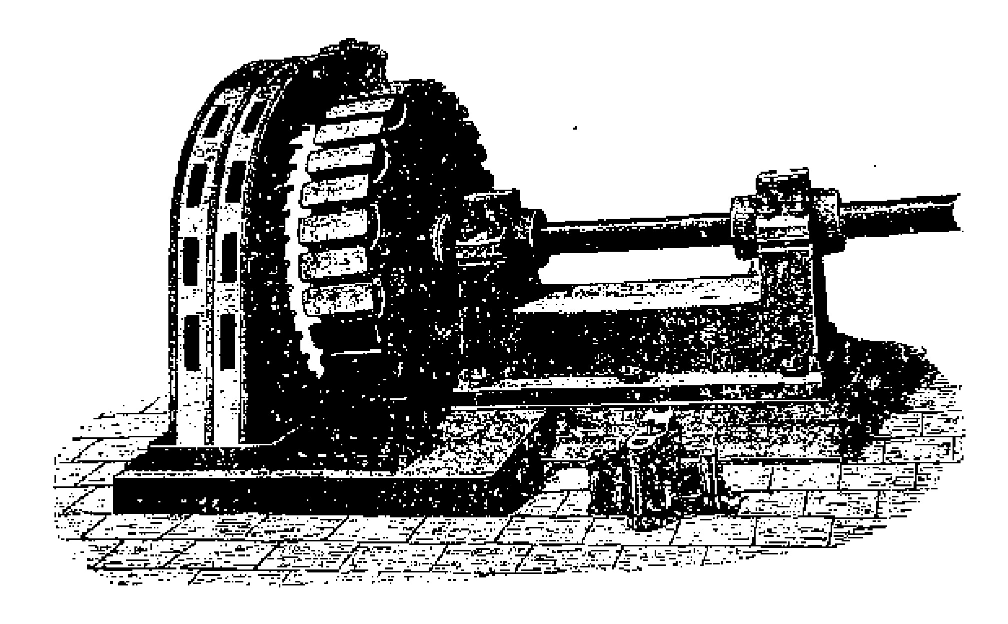


Рис. 53.

якорь, неподвиженъ. Внутри этого якоря вращается система электромагнитовъ, которые намагничиваются постояннымъ токомъ, получаемымъ отъ отдѣльной небольшой динамо, показанной также на рисункѣ. Арматура машины можетъ быть сдвинута со своего мѣста для болѣе удобнаго изслѣдованія состоянія электромагнитовъ. На рис. 53 показана машина со сдвинутою арматурою.

Система электромагнитовъ устроена крайне просто. Желѣзное кольцо съ двумя фланцами обмотано по своей окружности проволокой. Къ этому кольцу съ обѣихъ сторонъ привинчено по стальному кольцу, изъ которыхъ каждое на окружности имѣетъ 16 стальныхъ рожковъ. Эти кольца помѣщаются такъ, что система рожковъ одного кольца приходится какъ разъ въ серединѣ

между рожками другого. При пропусканіи тока по обмоткѣ, окружающей среднее желѣзное кольцо, эти рожки обращаются въ полюсныя оконечности, попеременно противоположнаго знака (рис. 54). Такимъ образомъ образуются 32 магнитныхъ потока въ желѣзо якоря, при чемъ потоки, слѣдующіе вокругъ кольца другъ за другомъ, противоположнаго направленія. Понятно, что при вращеніи этого кольца въ сосѣднемъ проводникѣ, пересѣкаемомъ силовыми линіями, при одномъ полномъ оборотѣ кольца произойдетъ *16 полныхъ* перемѣнъ индукціоннаго тока. Кольцо вращалось со скоростью 150 оборотовъ въ минуту. Число полныхъ перемѣнъ направленія тока, индуктировавшагося въ обмоткахъ якоря, было такимъ образомъ $150 \times 16 = 2400$ въ минуту, т. е. 40 въ одну секунду. Токъ, возбуждавшій магнитные потоки, входилъ въ обмотку кольца при помощи двухъ безконечныхъ проволочныхъ струнъ и двухъ роликовъ. Якорь машины представлялъ собою желѣзное кольцо, укрѣпленное въ чугунной рамѣ. Вблизи внутренней поверхности этого кольца, параллельно его оси, были сдѣланы на одинаковомъ разстояніи

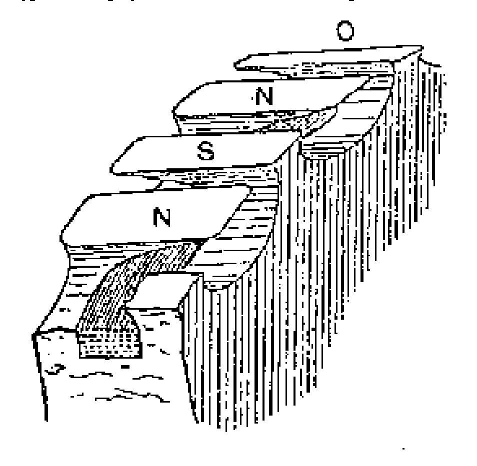


Рис. 54.

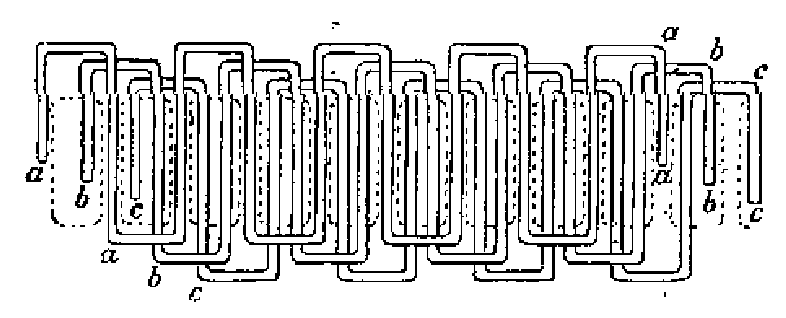


Рис. 55.

другъ отъ друга сквозныя отверстія, въ которыя были вставлены изолированные азбестомъ мѣдные стержни, діаметромъ въ 29 мм. Эти стержни на своихъ концахъ соединялись въ три системы. Каждая система состояла изъ 32 стержней, при чемъ разстояніе

стержней, составлявшихъ одну систему (a) (рис. 55), отъ стержней системы (b) равнялось $^2/_3$ разстоянія между серединами двухъ сосѣднихъ полюсныхъ рожковъ (рис. 55). Въ такомъ же разстояніи другъ отъ друга находились и двѣ другія системы (b и c). Легко видѣть что въ такомъ случаѣ въ этихъ трехъ отдѣльныхъ цѣпяхъ въ каждый моментъ времени должны были индуктироваться токи, которые отличались другъ отъ друга по фазѣ на 120°, ибо по отношенію къ этимъ цѣпямъ магнитные потоки находились всегда въ положеніяхъ, отличавшихся другъ отъ друга такъ, какъ по отношенію къ какому нибудь проводнику отличается какой-либо одинъ перемѣнный магнитный потокъ въ два момента времени, отстоящіе другъ отъ друга на $^1/_3$ періода измѣненія потока. — Три системы стержней соединялись на одномъ концѣ вмѣстѣ и сообщались съ землей, тремя же другими своими концами присоединялись къ проводамъ, ведшимъ въ трансформаторы.

По произведеннымъ измѣреніямъ оказалось, что энергія, передававшаяся во Франкфуртъ, составляла около 72% той энергіи, которая затрачивалась на приведеніе въ движеніе турбинъ въ Лауфенѣ. Какъ видно, успѣхъ перваго опыта былъ блестящій.

Лекція 6-я.

Описанная въ прошлую лекцію передача энергіи изъ Лауфена во Франкфуртъ имѣла лишь выставочную цѣль. Эта передача, осуществленная въ дѣйствительности, ясно доказала возможность пользоваться даровою силою природы для приведенія въ дѣйствіе заводскихъ машинъ и для другихъ технических надобностей не только въ томъ мѣстѣ, гдѣ проявляется такая даровая сила, т. е. гдѣ имѣется водопадъ или протекаетъ быстрая, обильная водою рѣка, но и вдали отъ этого мѣста, гдѣ рабочая сила непосредственно можетъ быть получена только на счетъ дорого стоющаго топлива. Вполнѣ понятно, что блестящій успѣхъ первой попытки передать энергію на разстояніе 175 километровъ, при сравнительно небольшихъ затратахъ на это, еще болѣе увѣрилъ предпринимателей въ правильности теоретическихъ расчетовъ и ускорилъ приведеніе въ исполненіе многихъ грандіозныхъ проектовъ. Въ настоящее время множество водопадовъ въ Западной Европѣ, и въ особенности въ Швейцаріи, являются источниками энергіи, распространяемой по проволокамъ на десятки верстъ. Но изъ всѣхъ многочисленныхъ гидроэлектрическихъ сооруженій невольно останавливаютъ на себѣ вниманіе сооруженія на Ніагарскомъ водопадѣ. Огромная масса воды изъ четырехъ большихъ американскихъ озеръ (Верхнее, Мичиганъ, Гуронъ и Эри), изливающаяся чрезъ Ніагарскій водопадъ въ озеро Онтаріо, съ весьма большою высотою паденія въ самомъ водопадѣ, представляетъ собою источникъ громадной энергіи. Не трудно подсчитать величину этой энергіи. Полный потокъ воды въ рѣкѣ Ніагара проноситъ въ одну секунду 7780 куб. метровъ воды чрезъ водопадъ. Высота паденія воды, если считать это паденіе отъ начала быстринъ на рѣкѣ (приблизительно на 1 милю, т. е. на 1609 м., выше самаго водопада) до уровня рѣки тотчасъ за мѣстомъ водопада, равняется 65,8 м. Умножая вѣсъ 7780 куб.

метровъ воды, т. е. 7780000 килограммовъ, на 65,8, мы получимъ выраженную въ килограммометрахъ ту кинетическую энергію, которая развивается въ теченіе одной секунды въ массѣ воды, излившейся чрезъ водопадъ. Эта энергія равняется 511924000 килограммометровъ. Если бы заставить всю эту энергію превратиться въ механическую работу, то получилось бы въ теченіе каждой секунды столько же килограммометровъ работы, т. е. машины, приводимыя въ движеніе съ затратою всей вычисленной энергіи падающей воды, теоретически развивали бы въ теченіе каждой секунды 511924000 килограммометровъ работы, т. е. обладали бы мощностью въ 6800000 лошадиныхъ силъ [1]). Какъ видите, запасъ энергіи на Ніагарѣ колоссальный. Небольшая доля этой энергіи, затраченная на механическую работу, дастъ уже возможность устройства многихъ заводовъ, причемъ пользованіе этою малою частью всей энергіи Ніагары ничтожно отразится на самомъ водопадѣ, мало измѣнитъ красоту величественнаго гиганта-водопада. Давно, еще въ 1725 г. былъ построенъ на Ніагарѣ пильный заводъ, но только въ послѣдніе годы энергіею водопада воспользовались въ большихъ размѣрахъ. Два большихъ акціонерныхъ общества были учреждены съ цѣлью эксплоатировать природныя богатства энергіи Ніагары. Одно общество подъ названіемъ «Niagara Falls Power Company», другое подъ названіемъ «Niagara Falls Hydraulic Power Company». Первое общество получило привилегію устроить *«силовой»* заводъ на американскомъ берегу рѣки Ніагары мощностью въ 100000 лошадиныхъ силъ, а кромѣ того оно получило привилегію и отъ Канадскаго правительства устроить на Канадскомъ берегу заводъ въ 250000 лошадиныхъ силъ. Второе общество, работающее на Американскомъ берегу, имѣетъ привилегію на 125000 лошадиныхъ силъ. Niagara Falls Power Company уже построило заводъ, доставляющій механическую энергію мощностью въ 40000 лошадиныхъ силъ. Niagara Falls Hydraulic Power Company въ скоромъ времени будетъ вырабатывать до 20000 лошадиныхъ силъ. Я не буду подробно излагать устройство сооруженій той и другой компаніи. Для этого потребовалось бы слишкомъ много времени. Я ограничусь лишь самымъ поверхностнымъ

---

[1]) 1 лошадиная сила = 75 килограммометровъ въ 1".

описаніемъ, достаточнымъ для полученія общаго представленія о способѣ трансформированія кинетической энергіи надающей воды въ электрическую энергію тока. Рис. 56 представляетъ видъ съ птичьяго полета, а также вертикальный разрѣзъ сооруженій Niagara Falls Power Company. Около 1 мили (1,6 килом.) выше водопада прорытъ на американской сторонѣ каналъ, наполняющійся водою изъ рѣки Ніагара. Этотъ каналъ, глубиною 3,6 м., имѣетъ длину въ 55 м. Количество воды, поступающей въ каналъ, достаточно для приведенія въ дѣйствіе машинъ въ 100000 лошадиныхъ силъ. На рисункѣ этотъ каналъ помѣщается въ верхнемъ лѣвомъ углу. На одномъ берегу этого канала построено зданіе для машинъ, выработывающихъ токъ, а на другомъ берегу помѣщеніе для трансформаторовъ, измѣняющихъ напряженіе этого тока. Непосредственно подъ зданіемъ для машинъ находится колодецъ для турбинъ въ видѣ громадной выемки въ скалѣ. Этотъ колодецъ, шириною въ 6 м. и длиною въ 130 м. имѣетъ глубину почти въ 55 м. Въ немъ могутъ помѣститься десять турбинъ, изъ которыхъ восемь уже находятся на мѣстѣ и дѣйствуютъ. Эти турбины вертикальныя и укрѣплены въ самомъ низу колодца. Вода изъ канала поступаетъ въ каждую турбину чрезъ отдѣльную трубу. Эти трубы для подвода напорной воды стальныя, ихъ діаметръ около 2,4 м. Всѣ турбины двойныя, т. е. каждая изъ нихъ представляетъ собою соединеніе на одной оси двухъ простыхъ турбинъ, изъ которыхъ чрезъ нижнюю вода устремляется внизъ, а чрезъ верхнюю вверхъ. Такимъ устройствомъ достигается значительное уменьшеніе давленія внизъ подвижной части турбины и присоединеннаго къ ней вала, такъ какъ къ верхнему турбинному колесу прикрѣпленъ особый поршень, на который вода производитъ давленіе снизу вверхъ. Турбинныя колеса, отлитыя изъ марганцовой бронзы, имѣютъ діаметръ въ 1,83 м. Онѣ снабжены кольцевыми, охватывающими ихъ снаружи, щитами-регуляторами. При своемъ подъемѣ эти щиты открываютъ турбину. Большій или меньшій подъемъ щитовъ-регуляторовъ производится при посредствѣ особаго механизма, находящагося въ машинномъ помѣщеніи. Турбина приводитъ въ движеніе вертикальный валъ, верхній конецъ котораго проходитъ чрезъ полъ машиннаго зданія и несетъ на себѣ горизонтально расположенное кольцо съ электромагнитами, воз-

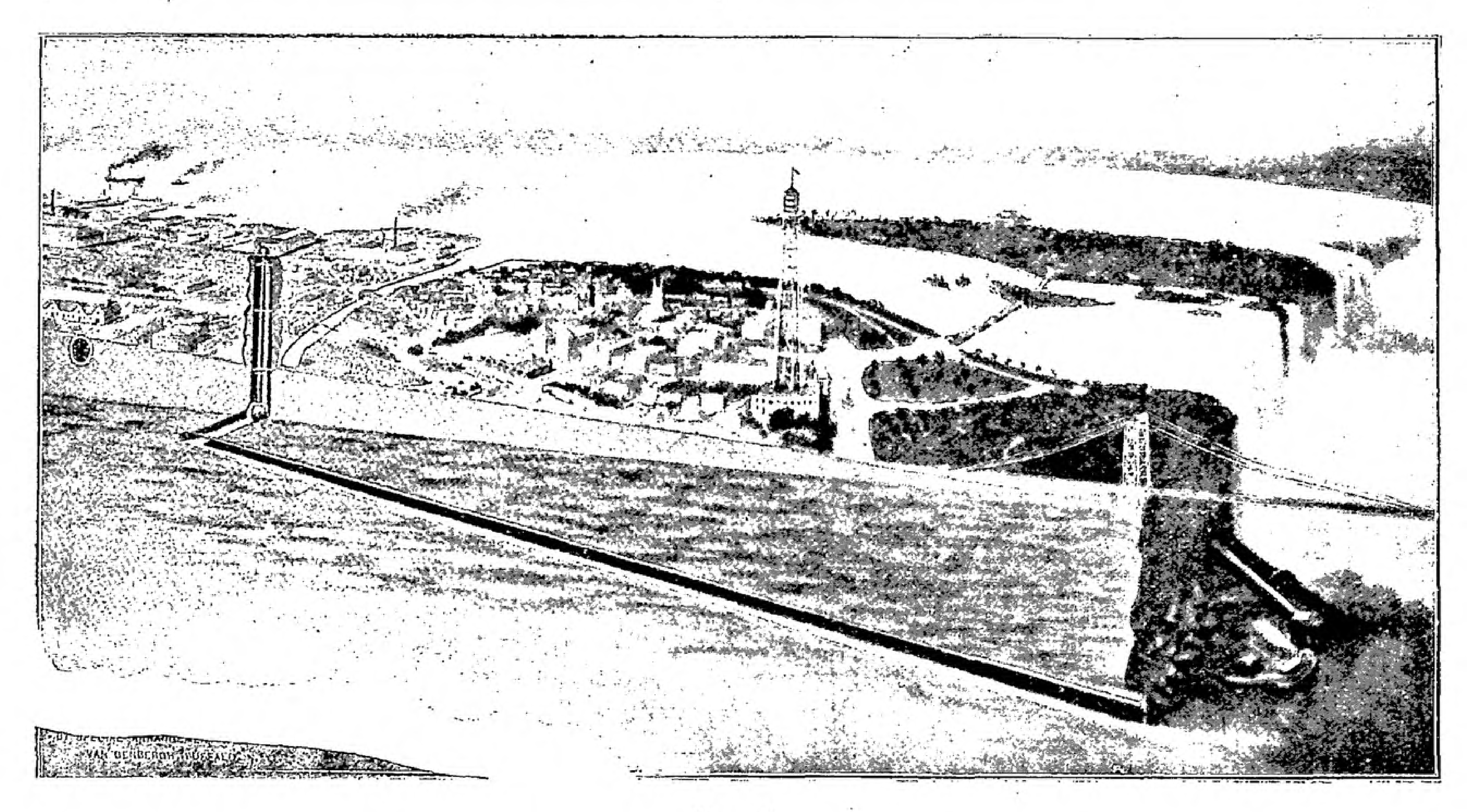


Рис. 56.

буждающими магнитное поле въ динамомашинѣ, арматура которой неподвижна и поддерживается массивнымъ чугуннымъ конусомъ, укрѣпленнымъ на арочномъ сводѣ, покрывающемъ турбин-

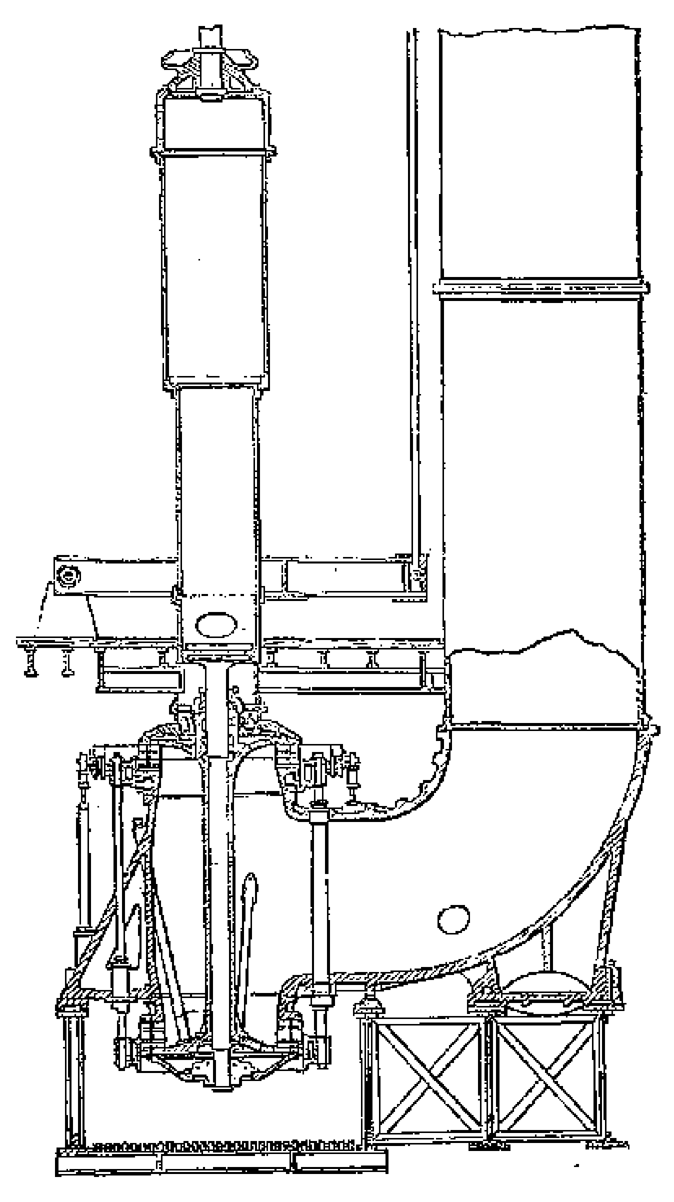


Рис. 57.

ный колодецъ. Валъ, передающій динамомашинѣ вращеніе турбины, на бóльшей части своей длины представляетъ собою трубу, склепанную изъ стальныхъ котельныхъ листовъ въ 9,5 мм. толщиною и имѣющую въ діаметрѣ около одного метра (965 мм.).

Внизу эта труба переходитъ въ сплошной цилиндръ, а наверху соединяется съ полымъ стальнымъ валомъ динамомашины, имѣющимъ въ діаметрѣ 279,4 мм. Каждая турбина, мощностью въ 5000 лошадиныхъ силъ, совершаетъ 250 оборотовъ въ минуту.

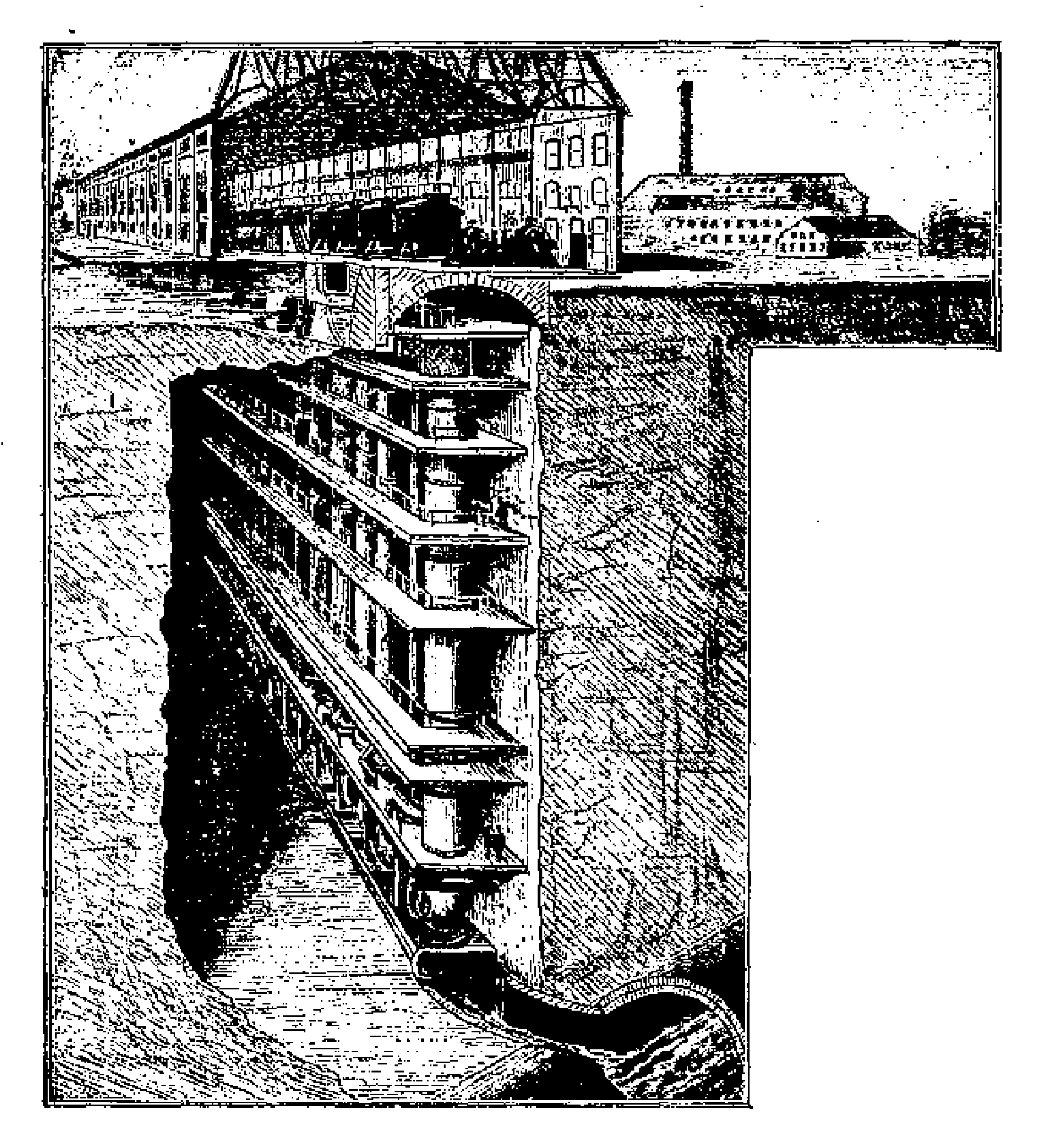


Рис. 58.

Рис. 57 изображаетъ вертикальное сѣченіе турбины и трубы, подводящей напорную воду. Рис. 58 представляетъ сѣченіе силоваго завода и колодца для турбинъ. Вода, вылившаяся


Рис. 59.

изъ турбинъ, втекаетъ въ туннель, имѣющій въ длину 2133 м. и оканчивающійся на самомъ берегу р. Ніагары нѣсколько ниже водопада вблизи моста, перекинутаго чрезъ рѣку. Рис. 59 изображаетъ вертикальный разрѣзъ туннеля, колодца и самаго силоваго завода. При томъ положеніи, которое занимаютъ турбины въ колодцѣ, высота водяного столба, дѣйствующаго на турбину, равняется 41,4 м. Рис. 60 изображаетъ вращающееся кольцо динамомашины. Къ этому кольцу прикрѣплены двѣнадцать электромагнитовъ, возбуждающихъ магнитное поле. Діаметръ этого кольца равняется 3,53 м. На рис. 61 видна арматура динамомашины, а также и вся динамомашина, уже собранная. Вѣсъ одной динамомашины равняется 85 тоннъ, т. е. 89364 килогр. или 5276 пуд. Одно вращающееся кольцо вѣситъ около 40 тоннъ, т. е. около 2480 пуд.

Тѣ динамомашины, которыя были поставлены въ первое время дѣйствія силового завода, возбуждались токомъ, получавшимся отъ динамомашины по-

стояннаго тока, которая приводилась въ движеніе паровою машиною. Теперь для этой цѣли, т. е. для полученія тока, возбуждающаго магнитное поле въ динамомашинахъ, устроены отдѣльные динамо-возбудители. Эти динамо-возбудители приводятся въ движеніе также турбинами, но только эти турбины совсѣмъ иного устройства, чѣмъ большія. Вода подводится къ нимъ по особымъ трубамъ. Динамо-возбудители даютъ токъ въ 220 вольтъ. Сила тока, возбуждающаго магнитное поле въ динамомашинахъ около

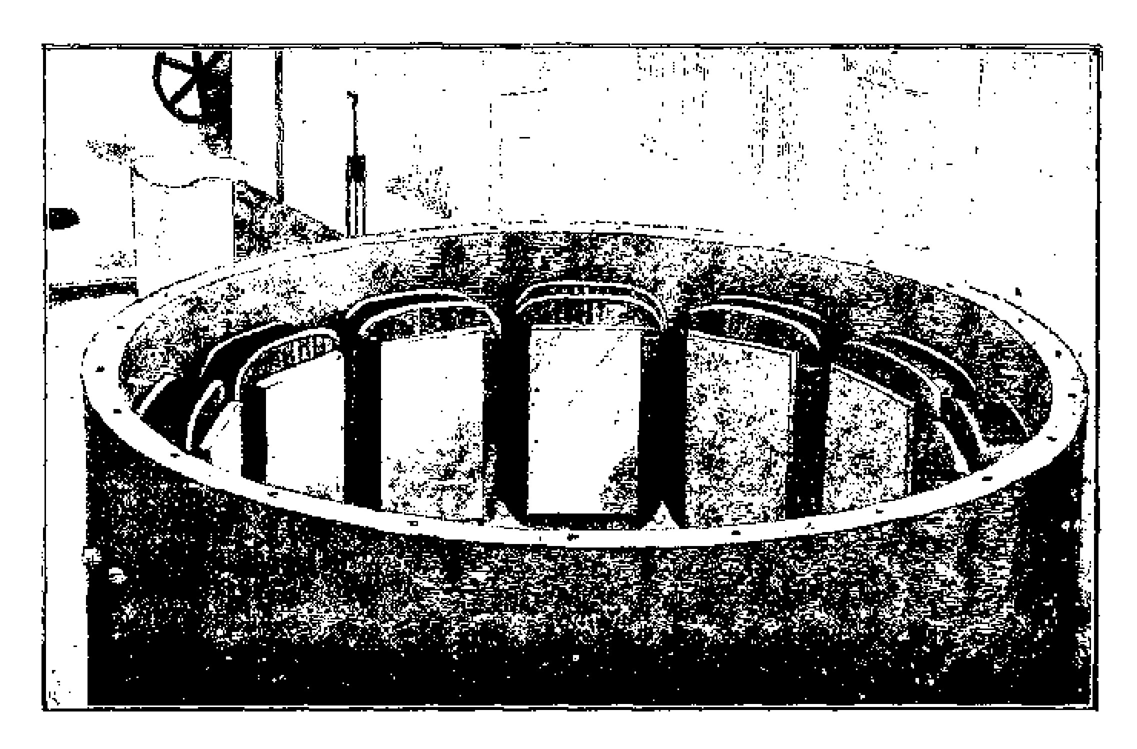


Рис. 60.

80 амперъ. Каждая динамомашина, или генераторъ, вырабатываетъ двухфазный токъ въ 2200 вольтъ. При помощи трансформатора двухфазный токъ въ 2200 вольтъ превращается въ той и другой изъ своихъ фазъ въ токъ, имѣющій напряженіе въ 440 вольтъ. Эти токи при помощи вращающагося трансформатора превращаются въ токъ постояннаго направленія и имѣющій напряженіе въ 550 вольтъ. Такой токъ нуженъ для приведенія въ движеніе вагоновъ мѣстнаго трамвая. Часть тока, получающагося отъ генераторовъ, превращается при помощи особыхъ трансформаторовъ изъ двухфазнаго въ 2200 вольтъ въ токъ,

трехфазный съ напряженіемъ въ 11000 вольтъ. Такого высокаго напряженія токъ передается по шести проводамъ въ г. Буффало на разстояніе 26 миль, т. е. на разстояніе 41,8 километра. Въ Буффало передается 6000 лошадиныхъ силъ. Остальная энергія поглощается заводами, расположенными вокругъ самаго силового

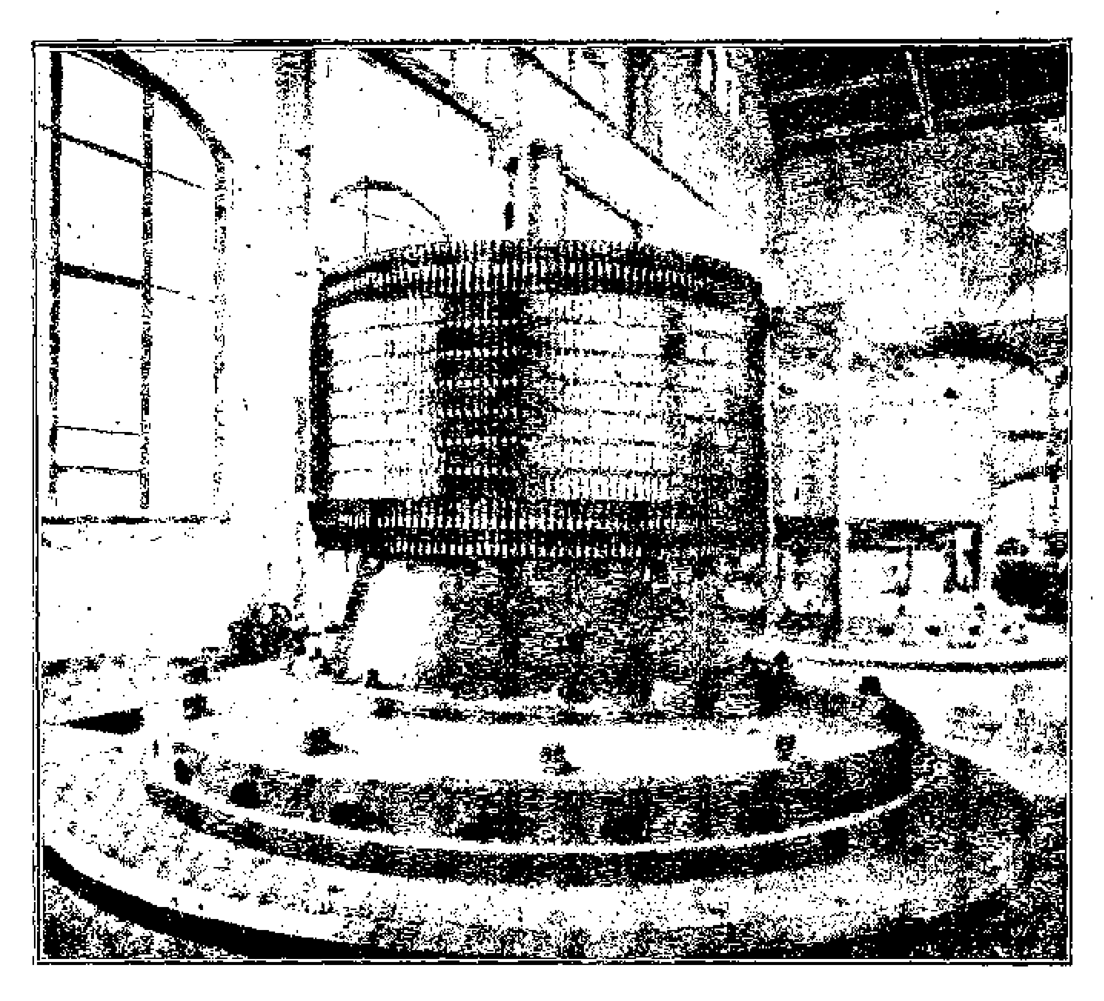


Рис. 61.

завода. Каналъ и туннель Niagara Falls Power Company служатъ также для приведенія въ движеніе турбинъ, принадлежащихъ Niagara Falls Paper Company. Эта компанія утилизируетъ около 8000 лошадиныхъ силъ.

Второе общество, т. е. Niagara Falls Hydraulic Power Company пользуется для своихъ турбинъ каналомъ, который начинается отъ р. Ніагары нѣсколько выше начала быстринъ этой рѣки,

около 600 м. ниже истока канала перваго общества, проходитъ чрезъ городъ и оканчивается бассейномъ, расположеннымъ за мостомъ въ разстояніи около 1/4 мили (400 м.). Изъ этого бассейна вода по трубамъ подводится къ горизонтальнымъ турбинамъ, помѣщеннымъ рядомъ съ силовымъ заводомъ, находящимся на берегу рѣки, нѣсколько выше уровня ея и на 61 м. ниже уровня воды въ рѣкѣ у начала канала. Въ настоящее время турбины развиваютъ 10500 лошадиныхъ силъ. Скоро мощность завода увеличится до 20000 лошадиныхъ силъ, а послѣ предполагаемаго расширенія канала и увеличенія бассейна она будетъ доведена до 100000 лошадиныхъ силъ. Когда оба общества окончатъ свои сооруженія, т. е. поднимутъ мощность своихъ силовыхъ заводовъ до той величины, какая предполагается по проектамъ, они, пользуясь только американскою частью Ніагарскаго водопада, будутъ доставлять болѣе 200000 лошадиныхъ силъ, т. е. такое количество энергіи, какое въ 1892 году получалось отъ всѣхъ *постоянныхъ* паровыхъ машинъ, работавшихъ въ Россіи Мы видимъ, насколько грандіозны эти сооруженія и какъ велика предпріимчивость американцевъ.

Нашъ Петербургъ могъ бы также получать огромную энергію, которая пока теряется безъ всякой пользы. Недалеко отъ Петербурга имѣются два большихъ водопада и оба эти водопада, Нарвскій (196,5 килом. отъ Петербурга) и Иматра (162,2 килом. отъ Петербурга), могли бы доставлять Петербургу десятки тысячъ лошадиныхъ силъ. Въ Нарвскомъ водопадѣ, по самому умѣренному расчету, работа паденія воды составляетъ 124000 лошадиныхъ силы; въ водопадѣ Иматра она болѣе 210000 лошадиныхъ силъ. Еще въ 1895 г. былъ составленъ инженеромъ В. Ф. Добротворскимъ проектъ утилизаціи этихъ водопадовъ для доставленія Петербургу электрической энергіи, но къ сожалѣнію этотъ проектъ остался только проектомъ и до сихъ поръ не сдѣлано ничего для приведенія его въ исполненіе. Мнѣ кажется, теперь пора заняться серьезно этимъ дѣломъ. Не слѣдуетъ откладывать этотъ вопросъ. Нужно поберечь наши дрова, нашъ уголь. Можно пользоваться и водою, которую намъ даромъ даетъ природа. Итакъ, будемъ надѣяться, что и у насъ въ недалекомъ будущемъ энергія воды пойдетъ на пользу, станетъ двигателемъ не малаго числа заводовъ.

ОГЛАВЛЕНІЕ.